

JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA FILHO

**ESTUDO DA RADIOSIDADE COM APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTOCÁSTICOS E
TESTE NUM PROBLEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Ciências, do
Programa de Pós-Graduação em Métodos
Numéricos em Engenharia, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.**

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Scheer

Curitiba

2005

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Sérgio Scheer.

Ao professor e amigo Aloísio Leoni Schmid, pelos anos de confiança.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, em especial aos Profs.: Drs. Roberto Dalledone Machado, Mildred Ballin Hecke, Ney Augusto Nascimento, pelos conhecimentos transmitidos, pelos anos de convivência e dedicação ao ensino e pesquisa.

Aos professores Drs. Luiz Alkimin de Lacerda e Andréa Sell Dyminski, a estima e consideração.

À professora Dra. Lucimara Stoltz Roman, Departamento de Física, pelo material bibliográfico e análise do PAD.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, pelo convívio.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, em especial à secretária Maristela Bandil, pela dedicação.

Ao LACTEC / COPEL, em especial ao engenheiro Rubens Lopes de Sá, pela avaliação fotométrica da luminária.

À Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Núcleo de Projetos em Engenharia Mecânica, pela avaliação do perfil do globo de polietileno.

Ao engenheiro Fernando Augusto Lopes Corrêa, pela ajuda na instalação da luminária no Campus.

À Maria Elizabeth Guthier Camati pelo apoio.

Aos meus pais, pelo amor incondicional.

A Deus, pela presença constante.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SIGLAS/TERMOS.....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	2
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2 SISTEMA VISUAL.....	5
2.1 SISTEMA VISUAL.....	5
2.1.1 Funções Receptoras da Retina.....	6
2.1.2 Fluxo da Informação Visual e Processamento.....	7
3 ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....	9
3.1 BENEFÍCIOS DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	9
3.2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....	10
4 CONCEITOS BÁSICOS EM ILUMINAÇÃO.....	12
4.1 ÂNGULO PLANO (θ) E RADIANO (rad).....	12
4.2 ÂNGULO SÓLIDO (Ω) E ESFERORADIANO (sr).....	12
4.3 GRANDEZAS ENERGÉTICAS.....	13
4.3.1 Energia Radiante / Énergie Rayonnante / Radiant Energy (Q)	13
4.3.2 Fluxo Radiante (potência) / Flux Énergétique / Radiant Flux (ϕ).....	13
4.3.3 Irradiância (iluminação)/ Éclairement Énergétique /Irradiance (E).....	13
4.3.4 Excitância Radiante / Excitance Énergétique ou Pouvoir Émissif / Radiant Excitance (M).....	14
4.3.5 Radiância (luminosidade) / Luminance Énergétique ou Brillance / Radiance (L)	14
4.3.6 Intensidade Radiante / Intensité Énergétique / Radiant Intensity (I).....	15

4.3.7 Reflexão.....	15
4.3.8 Reflexão Especular.....	15
4.3.9 Reflexão Difusa.....	16
4.3.10 Reflexão Perfeitamente Difusa.....	16
4.3.11 Reflectância Difusa ou Hemisférica (ρ).....	16
4.3.12 Reflectância Bicônica (ρ_{BIC}).....	17
4.3.13 Fator de Reflectância (fr).....	18
4.3.14 Albedo (a).....	18
4.3.15 Transmittância Hemisférica (τ).....	18
4.3.16 Absortância Hemisférica (α).....	19
4.3.17 Intervalo Espectral.....	19
4.3.18 Luz	19
4.3.19 Energia Luminosa.....	20
4.3.20 Fluxo Luminoso.....	20
4.3.21 Intensidade Luminosa (I).....	21
4.3.22 Iluminância (E).....	21
4.3.23 Excitância Luminosa.....	22
4.3.24 Luminância.....	22
4.3.25 Relação entre Intensidade Luminosa (I) e Intensidade de Iluminação ou Iluminação (E).....	23
4.3.26 Contraste	24
4.3.27 Ofuscamento	24
4.3.28 Acuidade Visual	25
5 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SIMULAÇÃO DA LUZ.....	26
5.1 UMA VISÃO DO CONHECIMENTO DE QUALIDADE DE ILUMINAÇÃO	26
5.2 RADIOSIDADE.....	27
5.2.1 Iluminação Baseada em Conceitos Físicos.....	27
5.2.2 Método da Radiosidade.....	28
5.2.3 Método da Radiosidade – Equação Integral.....	32
5.2.3.1 A equação integral da radiosidade.....	32
5.2.3.2 Formulação direcional.....	32
5.2.3.3 Formulação espacial.....	34

5.2.3.4 Equação de radiosidade por Galerkin.....	36
5.2.3.5 Visão do método de radiosidade por Galerkin.....	37
5.2.3.6 Aproximações constantes de radiosidade.....	38
5.3 MÉTODO DE MONTE CARLO.....	39
5.3.1 Características do Método de Monte Carlo.....	39
5.3.1.1 Extensa aplicabilidade.....	39
5.3.1.2 Simplicidade.....	40
5.3.1.3 Baixa convergência.....	40
5.3.2 Método de Monte Carlo: um Método de Último Recurso.....	41
5.3.3 Variáveis Aleatórias.....	42
5.3.3.1 Expectativa de uma variável aleatória.....	42
5.3.3.2 Variância da variável aleatória.....	43
5.3.3.3 Estimativa simples de Monte Carlo para somas e integrais.....	43
5.3.3.4 Estimadores secundários	44
5.3.3.5 Acurácia do método de Monte Carlo.....	45
5.3.3.6 Estimadores consistentes e tendenciosos.....	46
5.3.3.7 Estimativa da variância.....	46
5.3.3.8 Técnicas de redução da variância.....	46
5.3.3.8.1 Importância amostral.....	47
5.3.3.8.2 Ponderação amostral	48
5.3.3.8.3 Amostragem de variáveis aleatórias.....	48
5.3.3.8.4 Inversão da distribuição cumulativa.....	48
5.3.3.8.5 Amostragem estratificada.....	49
5.3.3.8.6 Rejeição amostral	49
5.4 MÉTODO DE RAY TRACING.....	50
5.5 RADIANCE.....	51
5.5.1 Fotorealismo e Visualização de Iluminação	51
5.5.2 Requisitos para Visualização de Iluminação.....	51
5.5.3 Capacidades Intrínsecas do Programa.....	52
5.5.4 Radiance – Ferramentas e Conceitos.....	55
5.5.5 Análise das Características do Programa.....	56
5.5.6 Geometria da Cena.....	56

5.5.7 Comandos Internos de Geração.....	57
5.5.8 Materiais de Superfície.....	57
5.5.9 Simulação de Luz e Renderização.....	59
5.5.10 Manipulação de Imagem e Análise.....	60
5.5.11 Integração.....	61
5.5.12 Cálculo Direto	61
5.5.13 Cálculo Indireto.....	63
5.5.14 Amostragem Especular	64
5.5.15 Armazenamento (caching) da Irradiância Indireta.....	68
5.5.16 Cálculo da Irradiância Indireta.....	68
5.5.17 Cálculo do Gradiente da Irradiância.....	69
5.5.18 O Gradiente de Rotação.....	70
5.5.19 O Gradiente de Translação.....	71
5.5.20 Interpolação para a Radiância.....	72
5.5.21 Múltiplas Reflexões Difusas	73
5.5.22 Aproximação por uma Constante Ambiente.....	74
5.5.23 Iluminação Difusa	74
5.5.24 Relação de Parâmetros para Renderização.....	74
5.5.25 Fontes de Luz Secundária.....	76
5.5.25.1 O material denominado illum.....	76
6 MÉTODO E PROCEDIMENTOS.....	78
6.1 OBJETO DE ESTUDO.....	78
6.2 COLETA DE DADOS.....	80
6.2.1 Levantamento Fotográfico e Bibliográfico.....	80
6.2.2 Da Análise em Laboratório.....	81
6.2.3 Da Simulação Numérica.....	83
7 CONCLUSÃO.....	94
8 REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A - TABELA DE RESULTADOS DO OBJETO MEDIDO EM LABORATÓRIO.....	99
APÊNDICE B - TABELA DE RESULTADOS DO OBJETO SIMULADO NO RADIANCE	101

APÊNDICE C - TABELA DE RESULTADOS DA LUMINÁRIA COM DIFUSOR....	102
APÊNDICE D - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS NO RADIANCE.....	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	- O OLHO HUMANO.....	7
FIGURA 2.2	- AS CÉLULAS NERVOSAS, CONES E BASTONETES DO OLHO HUMANO.....	7
FIGURA 4.1	- REPRESENTAÇÃO DA ILUMINÂNCIA.....	21
FIGURA 5.1	- IMAGENS GERADAS COM O MÉTODO DA RADIOSIDADE HIERÁRQUICO.....	30
FIGURA 5.2	- IMAGENS GERADAS COM O MÉTODO DA RADIOSIDADE CONSIDERANDO PARTICIONAMENTO E ORDENAMENTO.	31
FIGURA 5.3	- GEOMETRIA DE TRANSPORTE DA LUZ DIFUSA.....	33
FIGURA 5.5.1	- REPRESENTAÇÃO DA COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE O PROGRAMA RADIANCE E MEDIÇÕES REAIS SOB CONDIÇÕES DE LUZ DO DIA.....	54
FIGURA 5.5.1A	- DIAGRAMA DE REFLEXÃO DO RAIO.....	65
FIGURA 5.5.2	- REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DAS AMOSTRAS E DOS VETORES DIRECIONAIS USADOS PARA CALCULAR O GRADIENTE DA IRRADIÂNCIA.....	70
FIGURA 5.5.2a	- REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DAS IRRADIÂNCIA INDIRETAS E1, E2 CALCULADAS.....	72
FIGURA 5.5.3	- REPRESENTAÇÃO DE MÚLTIPLAS INTERREFLEXÕES.....	73
FIGURA 6.1	- LUMINÁRIA LOCALIZADA EM PRAÇA PÚBLICA.....	79
FIGURA 6.2	- ANÁLISE FOTOMÉTRICA EM ESFERA INTEGRADORA NO LACTEC/COPEL.....	80
FIGURA 6.3	- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO OBJETO EM ESTUDO.....	82
FIGURA 6.4	- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CURVA DE INTENSIDADE LUMINOSA EM LABORATÓRIO.....	83
FIGURA 6.5	- LEVANTAMENTO DO PERFIL DO GLOBO.....	84
FIGURA 6.6	- MODELOS CAD DE GLOBO E REFLETOR COM SUPERFÍCIES DIVIDIDAS EM ELEMENTOS DISCRETOS.....	85
FIGURA 6.7	- CURVA DE INTENSIDADE LUMINOSA DO EQUIPAMENTO SIMULADO E DO MEDIDO EM LABORATÓRIO.....	89

FIGURA 6.8	- VISUALIZAÇÃO DA RENDERIZAÇÃO	91
FIGURA 6.9	- MODELAMENTO DA LUMINÁRIA E FOTOGRAFIA.....	91
FIGURA 6.10	- REPRESENTAÇÃO POLAR DA INTENSIDADE LUMINOSA UTILIZANDO A NOVA LUMINÁRIA COM O GLOBO DE POLIETILENO.....	92
FIGURA 6.11	- VISUALIZAÇÃO DA LUMINÁRIA RENDERIZADA COM O GLOBO DE POLIETILENO.....	93
FIGURA 6.12	- VISUALIZAÇÃO DA LUMINÁRIA RENDERIZADA SEM O GLOBO DE POLIETILENO.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1	-	UNIDADES FOTOMÉTRICAS E FATORES DE CONVERSÃO (ILUMINAÇÃO).....	22
TABELA 4.2	-	UNIDADES FOTOMÉTRICAS E FATORES DE CONVERSÃO (LUMINÂNCIA).....	23
TABELA 4.3	-	TERMOS RADIOMÉTRICOS E FOTOMÉTRICOS, SÍMBOLOS E UNIDADES.....	23
TABELA 6.1	-	FORMAS DAS FONTES DE LUZ SÓLIDA E O MODELAMENTO...	86
TABELA 6.2	-	ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS E OUTROS ELEMENTOS EMPREGADOS NA SIMULAÇÃO.....	88

LISTA DE SIGLAS /TERMOS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia Elétrica
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
ELETRORBRAS	- Centrais Elétricas Brasileiras
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
EUA	- Estados Unidos da América
C.I.E	- Comissão Internacional de Iluminação
nm	- unidade equivalente a 10^{-9} do metro
μm	- unidade equivalente a 10^{-6} do metro
VRML	- <i>Virtual Reality Modelling Language</i> (linguagem para modelagem de realidade virtual)
CAD	- <i>Computer Aided Design</i> (desenho auxiliado por computador)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é verificar as condições de radiosidade de uma luminária estilo republicano utilizada em logradouros públicos e praças na cidade de Curitiba - Estado do Paraná. Para este estudo, aplicar-se-á o método de *ray tracing* estocástico para analisar os índices lumínicos do elemento em estudo. O critério aqui utilizado, proposto por WARD (1988), foi adotado devido a seu bom resultado em predições lumínicas.

Além do critério utilizado, far-se-á uma verificação dos resultados teóricos obtidos confrontando-os com os resultados experimentais controlados. Nesta pesquisa é feita a análise da luminária estilo republicano, como estudo de caso, em laboratório, realizando um diagnóstico do sistema global: lâmpada, luminária e acessórios.

Neste trabalho é feito um estudo da radiosidade, com uma revisão dos métodos utilizados para simular a iluminação, como os métodos da radiosidade, ray-tracing estocástico (método de Monte Carlo).

Palavras-chave: radiosidade; ray tracing; iluminação; Monte Carlo.

ABSTRACT

The purpose of this work is to verify the radiosity conditions of a republican style luminaire used at public streets and squares located in the city of Curitiba, State of Parana. For this study, we will apply the stochastic ray-tracing methods in order to analyse the luminous indices of the object in study. We will use WARD (1988) criterious which was chosen due to its good results on luminous predictions.

Besides the utilised criterious, a comparison between the theoretical results obtained will be made with experimental results. In this research the analysis of the luminaire is made at the laboratory to produce a diagnosys of the global system: lamp, luminaire and acessories.

In this work a radiosity study is made, with review of the radiosity method, stochastic ray tracing method (Monte Calo method).

Key-words: radiosity, ray tracing, illumination, Monte Carlo

1 INTRODUÇÃO

O segmento de iluminação pública registra elevados níveis de desperdício. As ações desenvolvidas pelo PROCEL, da ELETROBRÁS, vêm apresentando bons resultados no que se refere à priorização das trocas de lâmpadas ineficientes, como incandescentes e mistas, pelas de vapor de sódio, com luminárias também mais eficientes.

Pode-se afirmar que a iluminação pública, tal como se conhece hoje, isto é, voltada para a iluminação fixa, teve sua origem na Comuna de Paris, em 1558¹. Ao longo da civilização, a iluminação dos locais de trânsito de pessoas e de veículos sempre teve por objetivo oferecer algum nível de segurança. Essa é a essência da iluminação pública, cita FERNANDES FILHO (2000, p. 100).

A iluminação ornamental e decorativa sempre foi aplicada nas festividades e na ostentação de poder e riqueza, divergindo portanto dos propósitos de segurança. É bastante razoável caracterizar a iluminação pública como um serviço que visa oferecer algum nível de segurança ao trânsito de pessoas e veículos, ou de forma mais generalizada, logradouros públicos. Este, aliás, é o objetivo da iluminação pública enunciado pela NBR 5101 "Iluminação Pública".

Pode-se então classificar a iluminação pública em dois tipos: a iluminação pública com o objetivo de segurança e aquela que possui o objetivo decorativo ou ornamental.

¹ BOYCE, P.R. E Gutkowski, J.M. The if, why and what of the street lighting and street crime: A review. **Lighting Research and Tecnology**, 1995.

Além das características dos equipamentos e sistemas, a eficiência e a qualidade da iluminação pública são influenciadas pelas técnicas de projeto e gestão empregadas. Os fatores mais relevantes destinados a proporcionar a concepção de sistemas com baixo custo e bom desempenho, podem ser divididos em internos e externos. Os externos podem ser os pavimentos de rua (camada superficial que possui a capacidade de restituir a luz ao ambiente), as variações de tensão da rede elétrica, entre outros, e as internas, relacionadas aos elementos componentes da estrutura da iluminação pública propriamente dita, como postes de sustentação, lâmpadas, equipamentos elétricos auxiliares, transformadores de alimentação e as luminárias.

1.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Como se encontra a luminária estilo republicano empregada nos logradouros públicos e praças de Curitiba no que diz respeito às suas características de eficiência?

A resposta para esta pergunta poderá ser dada ao se investigar o conjunto que compõe esta luminária.

Para tal, este trabalho terá o seguinte escopo:

- A análise do conjunto da luminária se restringirá ao globo de polietileno de alta densidade (PAD) com 602 mm de altura, produzido pelo processo de rotomoldagem;
- A análise de uma luminária mais eficiente que será utilizada para fins de comparação;
- Este trabalho combina como método de pesquisa a simulação do objeto (luminária) em modelos numéricos e a verificação em modelos físicos;
- Com relação ao método numérico, o trabalho se propõe à utilização de métodos encontrados na literatura, já implementados em aplicativos voltados para a análise da iluminação. Será selecionado um método considerado mais adequado em função de suas características de precisão, consumo de tempo

computacional e disponibilidade de equipamento e software. Não será realizada a solução em diferentes métodos para efeito de comparação.

O objetivo principal deste trabalho é analisar o globo de polietileno de alta densidade aplicando o método de *ray tracing* estocástico, utilizando para tal o programa Desktop RADIANCE 2.0, na plataforma WINDOWS 98.

A hipótese principal é a de que a luminária estilo republicano não é eficiente, e isto pode ser demonstrado mediante mensuração direta *in situ* como também em laboratório. Considere-se somente o fato de se tratar de um projeto dos primórdios da República. Uma hipótese secundária aponta ser tal fato passível de demonstração mediante o emprego de método numérico selecionado (método de Monte-Carlo (*ray tracing* estocástico) e adaptado ao problema.

Uma importante motivação para a realização deste trabalho é o aspecto econômico. Deve ser considerado que a iluminação pública possui participação considerável nos gastos de energia elétrica do setor público brasileiro.

Com o advento do PROCEL, ELETROBRAS, o governo brasileiro começou a se preocupar com a melhoria da eficiência dos aparelhos consumidores de energia elétrica, inclusive os utilizados na iluminação pública.

Há também motivações ambientais para a realização deste trabalho, quais sejam:

- impactos ambientais na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Pode-se pensar que, ao se promover uma melhoria na efficientização dos sistemas que compõem os aparelhos de consumo de energia, evita-se ou minimiza-se a necessidade de novas construções para gerar, transmitir ou distribuir a energia;
- impactos ambientais relativos à poluição causadas pelos equipamentos de iluminação mal projetados e que causam descaracterização do ambiente noturno, com prejuízos à visibilidade dos transeuntes que utilizam os logradouros públicos ou praças e que também geram desconforto devido aos sistemas

causadores de excessiva luminosidade (brilho) em determinados locais e pouco em outros.

Sob o ponto de vista social, pode-se ressaltar o consumo desnecessário de recursos que seriam úteis para atender outras demandas como educação, saúde e segurança pública. Ressalta-se que a própria questão de segurança pública seria beneficiada mediante uma iluminação concebida mais racionalmente, pois permitiria às pessoas melhores condições de percepção visual, identificando potenciais agressores em potencial e outros fatores de risco.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 7 capítulos, assim distribuídos.

O capítulo 1 corresponde à introdução ao tema, com a justificativa, descrição do trabalho e de sua estrutura.

No capítulo 2 é apresentado o sistema visual, conjunto de órgãos dos sentidos do ser humano utilizado para captar os aspectos relativos à iluminação.

No capítulo 3 são apresentados alguns aspectos relativos à iluminação pública no Brasil.

O capítulo 4 inicia a revisão da literatura sobre os conceitos básicos referentes a iluminação.

O capítulo 5 inicia com a revisão dos métodos numéricos utilizados para a simulação da luz, a técnica da radiosidade e do *ray tracing* estocástico aplicados à simulação, bem como uma visão do método de Monte Carlo para a iluminação. Neste mesmo capítulo é dada uma visão geral do programa *Radiance* que utiliza o método de *ray tracing* estocástico, como alternativa às ferramentas dos programas conhecidos.

O capítulo 6 apresenta o método de pesquisa e os procedimentos, para o estudo de caso da luminária em estilo republicano, utilizada em Curitiba, com a análise deste equipamento em laboratório, no meio urbano e com a simulação numérica.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho, verificando-se se a hipótese inicial pode ser confirmada por meio do método empregado e dos resultados obtidos.

2 SISTEMA VISUAL

A inteligência humana é consideravelmente influenciada pelo sentido da visão, uma vez que cerca de dois terços das informações que chegam ao cérebro provêm do sistema visual. O homem busca entender a capacidade de ver há bastante tempo.

À medida que os organismos evoluem em complexidade, mais preciso e complexo fica o mecanismo de reconhecimento dos sinais visuais, aumentando, por conseqüência, a variabilidade de células nervosas visuais com diferentes funções e formatos. A luz provoca alterações químicas nestas células e estas enviam sinais ao córtex visual do cérebro, que interpreta estes sinais, obtendo então um modelo do estímulo recebido. Portanto, a compreensão do mecanismo da visão envolve a compreensão do processo de transmissão de sinais das células nervosas, apesar de ainda não se saber ao certo direito como estas informações são codificadas, processadas e transmitidas ao sistema nervoso. Atualmente, o desenvolvimento de modelos matemáticos e computacionais auxiliam na validação e complementação do nosso conhecimento a respeito das estruturas neurais (COSTA et al, 2000 e COELHO, 1998).

2.1 SISTEMA VISUAL

O sistema visual tem a função de reconhecimento, localização de objetos e controle dos movimentos oculares, além de prover informação para o controle da postura e movimento dos membros (LUNDY-EKMAN, 2000).

O olho pode ser comparado a “uma máquina fotográfica comum, sendo composto de lentes, um sistema de diafragma variável e uma retina, que corresponderia ao filme” (GUYTON, 1998).

A retina tem a função de perceber as variações de luz através das células receptoras chamadas cones e bastonetes. Os cones são responsáveis pela diferenciação das cores e os bastonetes percebem as variações de claro e escuro.

Quando estas células são excitadas, transmitem sinais sucessivos que percorrem a retina passando então para o nervo ótico até chegar ao cortex cerebral.

2.1.1 Funções Receptoras da Retina

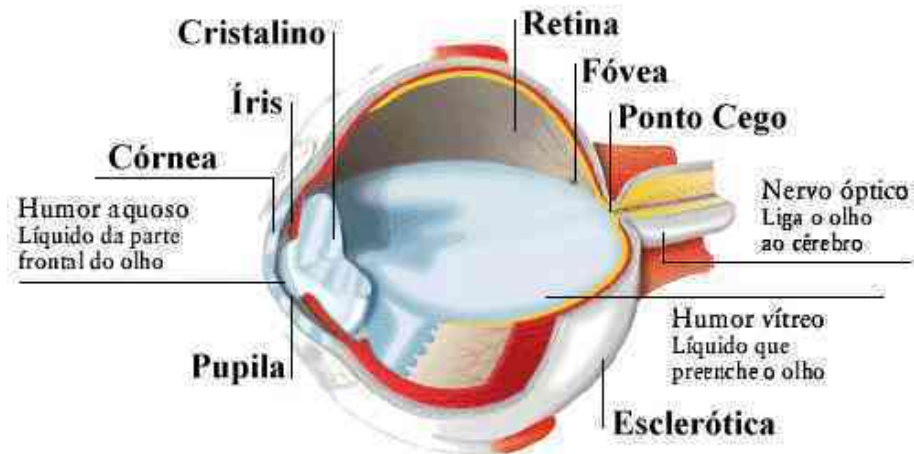
A luz ao passar pela retina e pelo humor líquido, segue para as células ganglionares, além de outras células das camadas internas, até chegar aos cones e bastonetes. A retina é composta de uma grande quantidade de substâncias químicas que provocam, quando interagem com a luz, uma reação química fazendo com que os cones e bastonetes transformem a luz em impulso elétrico.

A retina está situada na parte interna e posterior do olho e é composta de células nervosas distribuídas em camadas, seguindo a seqüência do caminho da luz (figura 2.1): Estas camadas estão assim distribuídas: (1) células ganglionares; (2) células amácrimas; (3) células bipolares; (4) células horizontais; (5) células receptoras – cones e bastonetes. A luz ao chegar a retina, passa pelas células ganglionares, amácrimas, bipolares e horizontais até chegar aos cones e bastonetes, passando então ao nervo óptico e seguindo para o encéfalo. A retina é composta por aproximadamente 125 milhões de bastonetes e seis cones convergem para cada fibra óptica (GUYTON, 1998).

A fóvea é parte de uma pequena região da retina chamada de mácula (figuras 2.1 e 2.2), ocupando uma área menor que 1 mm². Esta área é responsável pela visão nítida e detalhada e é composta inteiramente por cones alongados e com diâmetro de 1,5 µm, enquanto os cones localizados fora da região central são muito mais espessos. Na fóvea, as células ganglionares, os vasos sanguíneos e as camadas mais internas da retina estão distribuídos mais para o lado ao invés de se situarem no topo dos cones, diminuindo assim, a interferência na passagem da luz. Desse modo, a luz chega aos cones sem atravessar várias camadas, permitindo uma melhor acuidade visual, conforme GUYTON (1998). O caminho que a luz percorre sem atravessar várias camadas é chamado de caminho indireto. O caminho indireto é mais difuso devido as várias conexões laterais. Na fóvea, uma única célula ganglionar está conectada a uma única célula bipolar e esta a um único

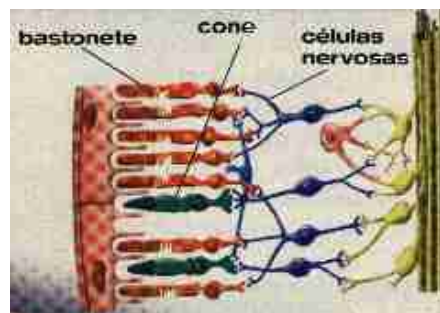
cone. O processo muda à medida que se deslocamos do centro para a periferia, onde há uma maior convergência de informações visuais (HUBEL, 1995).

FIGURA 2.1 - O OLHO HUMANO



FONTE: Internet

FIGURA 2.2 - AS CÉLULAS NERVOSAS, CONES E BASTONETES DO OLHO HUMANO



FONTE: Internet

2.1.2 Fluxo da Informação Visual e Processamento

Após a saída da retina, os impulsos elétricos (neurais) são conduzidos pelo nervo óptico, pelo trato óptico, com sinapses no núcleo geniculado lateral do tálamo. O nervo óptico é um conjunto de fibras que conduzem informações da retina até o quiasma óptico (quiasma corresponde à letra X em grego). Aqui todas as

fibras das metades nasais das duas retinas cruzam-se formando o trato óptico, conduzindo informações do quiasma óptico até o núcleo geniculado lateral, conforme GUYTON (1998) e LUNDY-EKMAN (2000). Assim, as informações do campo visual esquerdo chegam ao córtex visual através do núcleo geniculado lateral do lado oposto. “ Nestes núcleos ocorrem as primeiras sinapses no caminho das informações da retina para o córtex”, reporta TANAKA (2000).

3 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

O uso da energia elétrica contribuiu grandemente para o desenvolvimento social e econômico do Brasil durante os últimos anos. Iluminação elétrica, refrigeração de alimentos, e outros serviços que utilizam a energia elétrica contribuiu para o aumento da qualidade de vida de muitos brasileiros.

A eletricidade têm sido um fator chave no desenvolvimento industrial do País, a exemplo do uso intensivo no setor industrial tal como na produção de alumínio.

3.1 BENEFÍCIOS DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Incrementando a eficiência do uso da energia elétrica no País proporciona um vasto campo de benefícios. Primeiramente, aumentando esta eficiência, nos leva ao custo-benefício. O custo de conservação de energia é de US\$ 0,024 por kWh economizado em média. Em contraste, a tarifa média residencial estava em US\$ 0,133 por kWh, e a tarifa média industrial foi US\$ 0,058 por kWh. Assim, o custo com a economia de energia é muito menor do que o de fornecimento de energia elétrica (GELLER, 1991).

Segundo, a conservação de energia reduz a probabilidade de corte de eletricidade (“apagão”). O percentual de risco considerável aceitável para uma possível pane no sistema é de no máximo 5%. Aumentando a eficiência no uso da eletricidade é um caminho para diminuir a demanda e reduzir este risco de pane no sistema, sem afetar o crescimento econômico e, ou o padrão de vida (GELLER, 1991).

Terceiro, a conservação de energia reduz investimentos necessários para as empresas de utilidade pública. Investindo na eficiência do consumidor final resulta um menor investimento em relação às construções geradoras de energia e de transmissão de linhas. Isto implica na redução do tamanho geral do setor público (GELLER, 1991).

Quarto, aumentando a eficiência energética pode ajudar as indústrias e os seus produtos para competir no mercado mundial. Para algumas indústrias que fazem uso intensivo de energia elétrica, como a de alumínio, o aumento na eficiência na redução do consumo de eletricidade utilizada, pode significar redução de custo de produção. Os produtos brasileiros se tornarão mais atrativos para compradores estrangeiros, se estes possuírem eficiência energética (GELLER, 1991).

Quinto, a conservação de energia possui um aspecto muito mais favorável nos impactos sociais de meio ambiente em relação à geração e transmissão de energia. As usinas hidroelétricas podem inundar grandes áreas de terras, geralmente com deslocamento e retirada de povoados bem como na perda de recursos naturais. A queima de combustíveis fósseis e usinas nucleares apresentam poluição atmosférica, segurança e problemas com disposição de seus resíduos tóxicos. Por outro lado, aumentando a eficiência junto ao consumidor final, causa pouco ou nenhum dano ao meio ambiente (GELLER, 1991).

3.2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A iluminação de ruas consumiu algo em torno de 3,3 % da eletricidade consumida no País em 1988. A redução no consumo de eletricidade na iluminação pública de rua é um indicativo que a eficiência está aumentando a despeito da baixa tarifa paga pela municipalidade para a iluminação (GELLER, 1991).

A troca de lâmpadas incandescentes por vapor de mercúrio e pelas de vapor de sódio aumentaram no período de 1981 a 1988, na cidade de São Paulo. Neste mesmo período o número de lâmpadas instaladas nas vias no estado de São Paulo aumentaram 47%, mas a capacidade instalada aumentou algo em torno de 19% durante este período (Garcez, 1989).

Desde o estabelecimento do Programa Nacional de Conservação de Eletricidade (PROCEL), no final de 1985 houve considerável ganho de experiência na promoção da conservação de eletricidade. Projetos de pesquisa e desenvolvimento foram conduzidos em áreas de refrigeração, iluminação, aquecimento, motores e sistema de motores e construção. Exemplos de projetos

incluem: (1) construção de laboratórios para testar equipamentos domésticos; (2) desenvolvimento de equipamentos de refrigeração mais eficientes; (3) desenvolvimento e teste de aquecedores de água; (4) análise de lâmpadas fluorescentes compactas em residências; (5) desenvolvimento de métodos de avaliação de iluminação natural; (6) demonstração e teste de eficientes sistemas de iluminação em construções comerciais; (7) desenvolvimento e teste de medição da eficiência de fornos elétricos (GELLER, 1991).

Baseado nas estimativas de venda para iluminação pública, aproximadamente 1 milhão de lâmpadas incandescentes, 6,2 milhões de lâmpadas de vapor de mercúrio e 400 mil lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão foram utilizadas para a iluminação pública em 1988. As seguintes medidas de conservação são admitidos nos cenários de melhoria tecnológicas: (a) troca das lâmpadas incandescentes; (b) troca de lâmpadas *self-ballast*; (c) troca das lâmpadas de vapor de mercúrio (GELLER, 1991).

4 CONCEITOS BÁSICOS EM ILUMINAÇÃO

Este capítulo apresenta alguns conceitos referentes às grandezas físicas utilizadas no trabalho, para que se possa compreender a natureza dos fenômenos envolvidos.

O conceito de luz também é apresentado, conforme a definição dada pela sociedade americana de iluminação. Conceitos estes que podem ser encontrados em diversos livros, tal como em DRISROLL (1978).

4.1 ÂNGULO PLANO (θ) e RADIANO (rad)

Um ângulo plano é definido a partir da junção de dois raios denominados lados, tendo um extremo comum denominado de vértice. A medida de um ângulo plano é feita utilizando-se um segmento de arco de circunferência cujo centro está no vértice (intersecção dos lados). A medida do ângulo plano é igual à razão entre o comprimento C do arco e o raio r ou seja, $\theta = C / r$ [rad]. O ângulo medido desta forma está em radianos (rad) que é uma grandeza adimensional. Um radiano é um ângulo tal que o comprimento C do arco é igual ao raio r da circunferência. Em outras palavras, pode-se dizer que um radiano é um ângulo formado por dois raios (lados) que cortam um arco igual em tamanho ao raio. A circunferência inteira mede 2π rad enquanto que a semi-circunferência mede π rad.

4.2 ÂNGULO SÓLIDO (Ω) e ESFERORADIANO (sr)

O ângulo sólido representa o ângulo cônico definido a partir do centro de uma esfera pela razão entre a área da calota esférica A e o quadrado do raio r da esfera: $\Omega = A / r^2$ [sr]. O ângulo sólido constitui uma grandeza importante em aplicações que tratam com fluxos ou potências provenientes de diferentes direções de uma fonte.

A fórmula exata de cálculo do ângulo sólido é igual a $\Omega = 2.\pi.(1 - \cos \theta)$, onde θ é o ângulo plano de abertura do ângulo sólido.

Um esferoradiano (sr) é o ângulo sólido subentendido por uma área na superfície da esfera igual ao quadrado do raio da esfera. Uma esfera mede 4π sr enquanto que uma semi-esfera mede 2π sr.

Observação:

- $\Omega \rightarrow 0$: grandezas direcionais;
- $0 < \Omega < 2\pi$ sr: grandezas cônicas;
- $\Omega \rightarrow 2\pi$ sr: grandezas hemisféricas.

4.3 GRANDEZAS ENERGÉTICAS

Neste ponto são destacados algumas grandezas físicas relacionadas à energia luminosa e o conceito de luz, segundo a sociedade americana de iluminação.

4.3.1 Energia Radiante / Énergie Rayonnante / Radiant Energy (Q)

É a energia capaz de realizar trabalho, aquecer ou provocar mudança de estado físico, e que é transportada na forma de ondas eletromagnéticas. A unidade de medidas é o Joule (J).

4.3.2 Fluxo Radiante (potência) / Flux Énergétique / Radiant Flux (ϕ)

É a taxa de variação da energia radiante dQ no tempo dt , ou seja, $\phi = dQ / dt$. A unidade de medidas é o Watt (W). Fluxo radiante é a potência (em watts) da radiação eletromagnética emitida ou recebida por um corpo.

4.3.3 Irradiância (iluminação)/ Éclairement Énergétique /Irradiance (E)

É o fluxo radiante $d\phi_i$ proveniente de todo hemisfério que incide numa superfície, por unidade de área dA desta superfície, ou seja, $E = d\phi_i / dA$. É a densidade superficial do fluxo radiante que incide numa superfície. A unidade de

medidas é o $[W/m^2]$. Exemplo: Irradiância de uma superfície normal à radiação solar no exterior da atmosfera = $1.368 W/m^2$ (constante solar).

4.3.4 Excitância Radiante / Excitance Énergétique ou Pouvoir Émissif / Radiant Excitance (M)

É o fluxo radiante $d\phi_e$ emitido dentro de um hemisfério por uma superfície, por unidade de área dA desta superfície, ou seja, $M = d\phi_e / dA$. É a intensidade do fluxo radiante emitido por uma superfície. A unidade de medidas é o $[W/m^2]$.

4.3.5 Radiância (luminosidade) / Luminance Énergétique ou Brillance / Radiance (L)

A radiância, assim como a excitância radiante definida acima, também é a intensidade do fluxo radiante $d^2\phi$ emitido por uma superfície extensa com área dA só que dentro de um ângulo sólido $d\Omega$ e em uma determinada direção e posição definidas através de ângulos de inclinação θ e azimutal φ .

Logo, a radiância $L(\theta, \varphi)$ de uma fonte extensa com área dA numa determinada direção estabelecida pelos ângulos de inclinação e azimutal θ e φ é igual a $L(\theta, \varphi) = d^2\phi(\theta, \varphi) / (d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta)$ onde:

- $d^2\phi(\theta, \varphi)$ é o fluxo radiante proveniente da fonte extensa com área dA numa determinada direção θ ;
- $d\Omega$ é o ângulo sólido;
- $dA \cdot \cos\theta$ é a área perpendicular à direção θ .

A unidade da radiância é o $[W/m^2/sr]$, sendo que ela corresponde ao que se conhece por brilho da fonte no visível.

4.3.6 Intensidade Radiante / Intensité Énergétique / Radiant Intensity (I)

A intensidade radiante $I(\theta, \varphi)$ é o fluxo radiante $d\phi(\theta, \varphi)$ procedente de uma fonte pontual (pequena extensão em relação à distância de onde se faz a medida) por unidade de ângulo sólido $d\Omega$ medido numa determinada direção θ considerada.

Logo, $I(\theta, \varphi) = d\phi(\theta, \varphi) / d\Omega$. A unidade de medidas é o [W/sr].

A partir da definição de intensidade radiante, tem-se que a radiância é igual a : $L(\theta, \varphi) = d^2\phi / (d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta) = I(\theta, \varphi) / (dA \cdot \cos\theta)$, isto é, a radiância é a intensidade radiante $I(\theta, \varphi)$ proveniente de uma fonte em uma dada direção θ por unidade de área dA perpendicular a esta direção. A radiância é, portanto, a concentração do fluxo radiante com respeito à posição e direção.

4.3.7 Reflexão

A reflexão é o processo pelo qual o fluxo radiante, incidente numa superfície ou meio estacionário, deixa o lado incidente desta superfície ou meio estacionário sem mudança de frequência. Ou seja, retorna ao meio após incidir numa superfície.

4.3.8 Reflexão Especular

Uma superfície é um refletor especular quando os ângulos de incidência e reflexão da energia radiante obedecem às leis geométricas da reflexão, ou seja, quando os ângulos de incidência e reflexão são exatamente iguais e situados num plano perpendicular à superfície.

4.3.9 Reflexão Difusa

Uma superfície é um refletor difuso quando a energia radiante incidente reflete em múltiplas direções devido às irregularidades da própria superfície ou por esta ser constituída de um material óticamente heterogêneo. Um refletor difuso pode ser composto, teoricamente, por refletores especulares infinitamente pequenos contendo orientação e inclinação aleatórias.

4.3.10 Reflexão Perfeitamente Difusa

Uma superfície é perfeitamente difusora (ou lambertiana) quando a intensidade radiante I_θ que provém dela em qualquer direção varia com o cosseno do ângulo θ entre esta direção e a normal à superfície, ou seja, $I_\theta = I_0 \cdot \cos \theta$.

Esta equação corresponde à formulação matemática da Lei dos cossenos ou Lei de Lambert. No caso da radiância L_θ tem-se que $L_\theta = I_\theta / (dA \cdot \cos \theta) = (I_0 \cdot \cos \theta) / (dA \cdot \cos \theta) = I_0 / dA$, isto é, ela é constante para qualquer ângulo θ de reflexão, independentemente, portanto, da direção de observação.

4.3.11 Reflectância Difusa ou Hemisférica (ρ)

A reflectância difusa ρ de uma superfície é definida como a relação entre o fluxo $d\phi_r$ refletido pela superfície e o fluxo $d\phi_i$ nela incidente, ou seja, $\rho = d\phi_r / d\phi_i$.

No caso de um elemento de superfície dA , tem-se que a reflectância difusa ρ pode ser expressa como $\rho = d\phi_r / d\phi_i = (d\phi_r / dA) / (d\phi_i / dA) = M / E$, onde M é a excitância e E é a irradiância do elemento de superfície dA .

Os valores de ρ estão compreendidos entre zero e um, sendo importante salientar que a geometria dos fluxos incidente e refletido não foi considerada nestas definições.

A reflectância difusa ρ de uma superfície lambertiana é igual a $\rho = d\phi_r/d\phi_i = (\pi.L.dA) / (E.dA) = (\pi.L)/E$.

Forma de determinação da reflectância difusa em laboratório: através de esfera integradora que é um equipamento em forma de esfera com o interior pintado com sulfato de bário e possuindo quatro aberturas ou janelas:

- a) Janela 1: utilizada para a colocação da amostra cuja reflectância será determinada;
- b) Janela 2: serve para coletar a radiação proveniente do interior da esfera em direção a um radiômetro acoplado à esfera, onde será feito o registro efetivo da radiação. É a única janela que está num plano diferente das demais, plano este a aproximadamente 90° do plano das outras aberturas;
- c) Janela 3: oposta à janela 1, sendo empregada para colocação da fonte de luz que incide diretamente na amostra, gerando assim um fluxo de radiação refletida no interior da esfera que é medido através da janela 2;
- d) Janela 4: oposta à uma pastilha de sulfato de bário, que existe na superfície da esfera, e no mesmo plano das janelas 1 e 3. Serve para a colocação da fonte de luz que ao incidir na pastilha padrão gera o fluxo de radiação incidente na amostra, podendo ser medido através da janela 2.

4.3.12 Reflectância Bicônica (ρ_{BIC})

A reflectância bicônica é uma extensão da reflectância difusa para o caso em que a geometria dos fluxos incidente e refletido são importantes em sua determinação, ou seja, $\rho_{BIC} = d\phi_r(\Omega_r) / d\phi_i(\Omega_i)$, onde Ω_i e Ω_r são os ângulos sólidos que contêm os fluxos incidente ($d\phi_i$) e refletido ($d\phi_r$);

4.3.13 Fator de reflectância (fr)

O fator de reflectância fr é a razão entre o fluxo refletido $d\phi_r$ por um elemento dA da superfície em um cone, pelo fluxo radiante $d\phi_{r,id}$ que seria refletido no mesmo ângulo sólido por um refletor perfeitamente difusor, considerando as mesmas condições de iluminação, isto é, $fr = d\phi_r / d\phi_{r,id} = L_r(\Omega_r) / L_{id}(\Omega_r)$, onde Ω_r é o ângulo sólido utilizado para medir o fluxo refletido e L_{id} é a radiância do refletor lambertiano branco.

Caso se meça a radiação incidente diretamente, ao invés de usar uma superfície de referência, tem-se que L_{id} é substituído por E/π nesta expressão, resultando na seguinte equação: $fr = (\pi \cdot L_r(\Omega_r)) / E$. Esta equação para o fator de reflectância é equivalente às definições da reflectância difusa, caso a superfície observada seja lambertiana.

4.3.14 Albedo (a)

O albedo representa a fração da radiação solar que é refletida por uma superfície no hemisfério, ou seja, ele é o valor médio da reflectância de uma superfície na faixa espectral que varia de $0,3 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$ (domínio espectral do sol) aproximadamente.

4.3.15 Transmitância Hemisférica (τ)

É a razão entre a excitância radiante \mathbf{M} de uma superfície extensa na face oposta à incidente e a irradiância \mathbf{E} , ou seja,

$$\tau = \mathbf{M} / \mathbf{E}$$

4.3.16 Absortância Hemisférica (α)

Devido à lei da conservação da energia, a absortância é o complemento de 1 da soma da reflectância hemisférica ρ com a transmitância hemisférica τ , ou seja, $\alpha = 1 - \tau - \rho$.

4.3.17 Intervalo Espectral

As grandezas definidas nos itens de (4.3.1) a (4.3.16), a menos do albedo (4.3.14), podem ser acrescentadas ainda uma denominação em função do intervalo de comprimentos de onda ($\Delta \lambda$) a que elas se referem, de acordo com a seguinte referência:

- grandezas espectrais: $\Delta \lambda \rightarrow 0$;
- grandezas espectrozonais: $0 < \Delta \lambda < \infty$;
- grandezas totais: $\Delta \lambda \rightarrow \infty$.

4.3.18 Luz

Para os fins da engenharia de iluminação, a sociedade de engenharia de iluminação dos EUA definiu a luz como a energia radiante que é capaz de excitar a retina humana e criar uma sensação visual. Do ponto de vista da física, luz é a porção do espectro eletromagnético entre os limites de comprimento de onda compreendido entre 380 nm a 770 nm.

A máxima eficiência do olho humano para converter energia radiante em resposta visual se dá, durante o dia (ambientes claros - visão fotóptica), a 550 nm, produzindo a sensação de verde-amarelado. Durante a noite (ambientes escuros - visão escotóptica), este valor recua para 500 nm diminuindo a capacidade de determinar cores:

- Luz visível: 400-700 nm;
- Luz ultravioleta: < 400 nm (absorvida pela córnea, não atinge a retina);

- Luz infravermelha: > 700 nm (atinge a retina mas não produz estímulos visuais).

O olho humano médio (padrão) pode discriminar aproximadamente cinco milhões de cores e duzentos níveis de cinza.

4.3.19 Energia Luminosa

É a quantidade de luz, ou seja, é a quantidade de energia radiante na faixa espectral que varia de 380 a 770 nm, considerando-se a eficácia luminosa da radiação.

4.3.20 Fluxo Luminoso

É a taxa na qual a luz é transferida de um ponto ou superfície a outra superfície. O componente de qualquer fluxo radiante que gera uma resposta visual é chamado de fluxo luminoso. A unidade para o fluxo luminoso é o lúmen (lm).

O fluxo luminoso (F) para um feixe de radiação de uma distribuição espectral P_λ é dado por :

$$F = k \int P_\lambda V_\lambda d\lambda \dots\dots\dots (4.1)$$

onde:

- P_λ radiação espectral no comprimento de onda λ ;
- V_λ fator de luminosidade relativo para o comprimento de onda λ ;
- k constante que é função das variáveis consecutivas.

O fluxo luminoso é assim proporcional à leitura de um detector físico cuja curva de resposta é a mesma encontrada na curva de visibilidade fotópica da C.I.E. O fluxo luminoso é equivalente ao fluxo radiante.

4.3.21 Intensidade luminosa (I)

É equivalente à intensidade radiante. É o fluxo luminoso procedente de uma fonte por unidade de ângulo sólido na direção considerada. A luz que se propaga numa dada direção, dentro de um ângulo sólido unitário, é chamada intensidade luminosa (I) e sua unidade é lúmen/steradiano ou candela (cd).

$$I = \frac{dF}{d\Omega} \dots\dots\dots (4.2)$$

onde Ω é o ângulo sólido

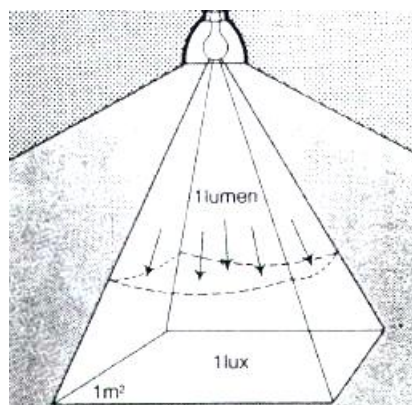
4.3.22 Iluminância (E)

É equivalente à irradiância. É o fluxo luminoso proveniente de todo hemisfério que incide numa superfície, por unidade de área desta superfície. É a densidade do fluxo luminoso que incide numa superfície. Sua unidade é lúmen/m² ou lux (figura 4.1).

A iluminância (E) em uma área dS é dada por:

$$E = \frac{dF}{dS} \dots\dots\dots (4.3)$$

FIGURA 4.1 - REPRESENTAÇÃO DA ILUMINÂNCIA



FONTE: O autor

4.3.23 Excitância Luminosa

É o fluxo luminoso emitido dentro de um hemisfério por uma superfície, por unidade de área desta superfície (A). É a intensidade do fluxo luminoso emitido por uma superfície.

A excitância luminosa é equivalente à excitância radiante.

4.3.24 Luminância

A luminância (L) pode ser considerada como uma medida de brilho de uma superfície. A luminância é definida como a intensidade luminosa por unidade de área aparente de uma superfície numa dada direção e sua unidade no SI é candela/ m² (cd/ m²). O olho humano detecta luminância da faixa de um milionésimo de cd/m² até um 1.000.000 (um milhão) cd/m², um limite máximo, a partir do qual a retina é danificada. O ofuscamento, ou impedimento da visão, ocorre a partir de 25.000 cd/ m².

A luminância é equivalente à radiância. Considerando uma direção que faz um ângulo θ com a superfície plana, tem-se:

$$L = \frac{1}{\cos \theta} \frac{dI(\theta)}{dS} \dots\dots\dots (4.4)$$

As tabelas 4.1 e 4.2 referem-se a algumas unidades fotométricas e seus respectivos fatores de conversão.

A tabela 4.3 apresenta os termos radiométricos e fotométricos.

TABELA 4.1 - UNIDADES FOTOMÉTRICAS E FATORES DE CONVERSÃO (ILUMINAÇÃO)

unidades	1 lm/m²	1 lm/cm²	1 lm/ft²
1 lm/m ² (lux)	1	10 ⁻⁴	9,3x10 ⁻²
1 lm/cm ² (phot)	10 ⁻⁴	1	9,3x10 ²
1 lm/ft ² (ft.candle)	10,76	1.076x10 ⁻³	1

TABELA 4.2 - UNIDADES FOTOMÉTRICAS E FATORES DE CONVERSÃO (LUMINÂNCIA)

unidades	1 cd/cm ²	1 cd/ft ²	1 lm/cm ²	1 lm/ft ²
cd/cm ² (stilb)	1	9,3x10 ²	3.142	2,919x10 ³
cd/ft ²	1,1x10 ⁻³	1	3,4x10 ⁻³	3,14
lm/cm ² (lambert)	3,18x10 ⁻¹	3,42x10 ²	1	9,29x10 ²
lm/ft ² (ft. lambert)	3,42x10 ⁻⁴	2,92x10 ⁻¹	1,1x10 ⁻³	1

TABELA 4.3 - TERMOS RADIOMÉTRICOS E FOTOMÉTRICOS, SÍMBOLOS E UNIDADES

Termo	Símbolo	unidade
Energia		
radiante	Q	Watt [W]
luminosa	F	lúmen [lm]
Excitância		
radiante	M	Watt/m ² [W m ⁻²]
luminosa	M	lúmen/m ² [lm m ⁻²]
Intensidade		
radiante	I	Watt/esterradiano [Wsr ⁻¹]
luminosa	I	candela [cd]
Radiância	L	Watt/esterradiano/m ² [Wsr ⁻¹ m ⁻²]
Luminância	L	Candela/ m ² [cd m ⁻²]
Irradiância	E	Watt/m ² [W. m ⁻²]
Iluminância	E	lx

4.3.25 Relação entre Intensidade Luminosa (*I*) e Intensidade de Iluminação ou Iluminação (*E*)

Existe uma relação de proporcionalidade entre *E* e *I*, $E \propto I$, onde *E* é a intensidade de iluminação de uma fonte de intensidade luminosa *I*. A intensidade de iluminação também depende da distância do ponto em consideração até a fonte. Existe também uma variação inversa com o quadrado da distância da fonte até o ponto em consideração. Então:

$$E \propto \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots (4.5)$$

No séc. XVIII Lambert mostrou que a intensidade de iluminação sobre um ponto na superfície é proporcional ao $\cos \theta$, onde θ é o ângulo entre a normal no ponto na superfície e a linha que une a fonte ao ponto. Temos então:

$$E = \frac{I \cos \theta}{r^2} \dots\dots\dots (4.6)$$

Esta é uma equação fundamental em fotometria.

4.3.26 Contraste

É definido como as diferenças de brilho (luminância) entre os objetos e as superfícies no campo visual. Alguns autores definem as diferenças de brilho como a razão entre as luminâncias e até adotam o termo "proporção de contraste", assim temos:

$$C = \frac{L_o - L_a}{L_a} \dots\dots\dots (4.7)$$

onde:

L_o = luminância da superfície;

L_a = luminância do fundo

4.3.27 Ofuscamento

A ocorrência de grandes diferenças de contraste entre a área da tarefa e a circunvizinha acabam gerando ofuscamento, inconveniente para os ambientes, principalmente de trabalho. A ocorrência de grandes diferenças de contraste resultam normalmente de reflexos, focos de luz e sombras existentes no campo visual.

4.3.28 Acuidade Visual

É a medida da habilidade do olho em discernir detalhes, definida em termos do ângulo visual contido nos extremos do menor detalhe perceptível ou contido entre dois objetos que os olhos ainda podem distinguir. Este ângulo é expresso em minutos e a acuidade por:

$$a = \frac{1}{\alpha} \dots\dots\dots (4.8)$$

sendo:

$$\alpha = \text{arc tg } H/D;$$

H = altura do menor detalhe ;

D = distância do olho ao objeto.

5 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SIMULAÇÃO DA LUZ

Técnicas de radiosidade e *ray tracing* são exploradas por desenvolvedores de programas em sua busca para o correto balanceamento entre eficiência na simulação e realismo. Os softwares computacionais para esta finalidade prestam um importante serviço nas práticas arquitetônicas com as companhias, desenvolvendo opções tais como VRML, animação interativa, estudo de iluminação natural e artificial. Estes softwares (Lightscape, Radiance, Inspirer, dentre outros) simulam conceitos espaciais e podem mostrar características dos materiais e as implicações quanto às texturas. Embora estas funções existam como ferramentas padrão em quase todos os programas de projeto de desenho, há um outro conjunto de programas de renderização que considera o modelamento das características físicas da luz no espaço. Usa-se então esta capacidade para produzir visualizações mais realísticas em relação aos programas CAD normais.

5.1 UMA VISÃO DO CONHECIMENTO DE QUALIDADE DE ILUMINAÇÃO

Definição e concordância a respeito de qualidade de iluminação é um tópico bastante debatido. VEITCH e NEWSHAM (1996) recomendam na direção futura da pesquisa de qualidade da luz. Eles basearam sua pesquisa em uma definição comportamental da qualidade da luz: qualidade satisfatória de luz existe (no espaço) quando as condições luminosas são adequadas para as necessidades das pessoas que utilizarão este espaço. Estas necessidades são agrupadas em seis tópicos relacionados abaixo. Diz-se haver uma boa qualidade de iluminação quando o sistema de iluminação apresenta as seguintes características:

- a) qualidade visual, isto é, quando são criadas boas condições de iluminação de trabalho;
- b) desempenho visual melhorado, isto é, auxilia no desempenho das tarefas;
- c) comunicação e interação social, isto é, quando promove melhoria na comunicação e interação;

- d) estado de humor (felicidade, vigilância, satisfação, etc.), isto é, a criação de uma situação de humor;
- e) saúde, isto é, cria boas condições de saúde e afasta os efeitos da doença;
- f) juízo de estética, isto é, contribui para apreciação estética do espaço.

O julgamento estético de um meio iluminado é o fator da qualidade da luz que mais depende do que foi imposto da iluminação. A simulação visual representa a aparência dos espaços e portanto assegura algum potencial como ferramenta de análise da característica estética da qualidade da luz. Pesquisa da influência estética da iluminação no espaço feita por FLYNN et al. (1973) foi capaz de determinar três fatores na qualidade da iluminação: clareza perceptiva, impressões avaliativas e amplitude.

5.2 RADIOSIDADE

O método da radiosidade é baseado em conceitos físicos para calcular a iluminação em um ambiente virtual com superfícies difusas, permitindo gerar imagens pelo computador muito próximas da realidade de um ambiente real, possibilitando prever quantitativamente os níveis de iluminação deste ambiente. O método da radiosidade requer a solução de sistemas de equações lineares muito elevados onde os coeficientes desse sistema são integrais quadri-dimensionais de solução não trivial.

O método de Monte Carlo é utilizado neste contexto permitindo o cálculo destes coeficientes do sistema de equações.

5.2.1 Iluminação Baseada em Conceitos Físicos

O objetivo da iluminação baseada em conceitos físicos é calcular a iluminação de um ambiente, de maneira acurada, através do uso de computadores, utilizando-se de conceitos físicos, permitindo então gerar imagens computacionais fotorealistas em que os efeitos da iluminação são reproduzidos com alta

confiabilidade no que tange aos resultados. Os efeitos podem ser chamados de globais quando a iluminação resultante é devida às interações da luz nas inúmeras superfícies envolvidas. Em contraste, pode ser dito que os efeitos da iluminação são locais quando há interação entre a fonte de luz, uma superfície e o ponto de vista do observador.

A iluminação baseada em conceitos físicos encontra aplicações em áreas tais como visualização de projetos arquitetônicos, em engenharia civil, em projetos de iluminação e otimização de iluminação.

Uma introdução elaborada e mais completa sobre iluminação baseada em conceitos físicos, bem como uma descrição mais detalhada do método da radiosidade, pode ser encontrada em COHEN e WALLACE (1993) e SILLION e PUECH (1994).

5.2.2 Método da Radiosidade

O método da radiosidade, introduzido primeiramente por GORAL et al. (1984), COHEN e GREENBERG (1985) e NISHITA e NAKAMAE (1985), é um método de síntese de imagem de um objeto tridimensional para ambientes que consistem exclusivamente de superfícies emissoras e receptoras de luz perfeitamente difusas (lambertianas). O método da radiosidade consiste basicamente de quatro passos. Estes passos são enumerados para o método da radiosidade clássico:

1. discretização do ambiente virtual em polígonos convexos planos, chamados *malhas*. Para cada malha i , a intensidade da iluminação auto emitida, expressa pela radiosidade própria E_i (W/m^2), e a refletância difusa ρ_i é determinada. A refletância difusa é um número adimensional entre 0 e 1, expressando uma fração da iluminação incidente que é refletida. A refletância e emitância difusas são consideradas constantes sobre cada malha;
2. cálculo dos fatores de forma F_{ij} para malha i e j . O fator F_{ij} é um número sem dimensão e expressa qual fração da iluminação incidente sobre a malha i é devida a malha j ;

3. solução do sistema de equações lineares:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_j F_{ij} B_j \dots\dots\dots(5.1)$$

As incógnitas B_i são a radiosidade total média na malha i (W/m^2) e expressa a intensidade da iluminação total difusa por malha na cena;

4. visualização da solução como observado de um ou mais pontos de vista. Este passo envolve determinação de superfícies visíveis e mapeamento de tonalidade.

A equação (5.1) expressa a iluminação B_i em uma malha i com sendo a soma da iluminação própria e a iluminação incidente refletida de outras malhas. A iluminação incidente é a soma ponderada da iluminação de outras malhas j . Os pesos são os fatores de forma F_{ij} . Uma fração ρ_i da iluminação incidente é refletida.

A aplicação do método da radiosidade apresenta algumas dificuldades, podendo-se citar as seguintes: criar a malha, calcular os fatores de forma e o armazenamento.

O processo de discretização das superfícies da cena em malhas exige a captura precisa das variações de iluminação: alteração na visibilidade com fontes de luz primária ou secundária resultará em descontinuidade de várias ordens na função radiosidade; na ausência de mudança na visibilidade a função radiosidade varia suavemente, conforme HECKBERT (1991) e LISCHINSKI et al. (1992). O método clássico da radiosidade somente calcula um valor constante de radiosidade para cada malha. Mesmo com polinômios de aproximação para radiosidade de ordens superiores, conforme HECKBERT (1991), HECKBERT e WINGET (1991), TROUTMAN e MAX (1993) e ZATZ (1993), torna-se necessário um refinamento da malha para representar de maneira acurada as variações de iluminação nestas regiões.

O cálculo acurado do fator de forma F_{ij} requer o cálculo de integrais não triviais consumindo maior tempo de processamento no método. O fator de forma entre duas malhas é dado por uma integral quadri-dimensional. Soluções analíticas

existem somente no caso de visibilidade total e aproximações para radiosidade constante, conforme BAUM et al. (1989) e GORTLER et al (1993).

Algumas imagens são mostradas utilizando-se o método da radiosidade. A figura 5.1 mostra algumas cenas renderizadas, conforme BEKAERT et al.:

FIGURA 5.1 – IMAGENS GERADAS COM O MÉTODO DA RADIOSIDADE HIERÁRQUICO



Fig. 5. Complex scenes rendered with hierarchical Monte Carlo radiosity: theatre (39,000 initial polygons, refined into 88,000 elements, 5 minutes), conference room (125,000 polygons, refinement yields 178,000 elements, 9 minutes) and cubicle office space (128,000 polygons, refined into 506,000 elements, 10 minutes). Model credits: see acknowledgements in paper.

FONTE: BEKAERT et al. **Hierarchical Monte Carlo radiosity**. Disponível em: <<http://www.cs.kuleuven.ac.be/cwis/research/graphics/CGRG.PUBLICATIONS/HMC/hmtc.html>>

Na figura 5.2 *Plate I* foi renderizado um andar com todo o mobiliário; em *Plate II*, um escritório; em *Plate III*, mostra discretização da malha do escritório; em *Plate IV*, uma sala de trabalho e em *Plate V*, um corredor.

Figura 5.2 - IMAGENS GERADAS COM O MÉTODO DA RADIOSIDADE CONSIDERANDO PARTICIONAMENTO E ORDENAMENTO



Plate I. The entire furnished floor, solved to one inch effective resolution (734,665 elements).



Plate II: Office, gouraud shaded.



Plate III: Office, meshed.



Plate IV: Workroom, gouraud shaded.



Plate V: Hallway, gouraud shaded.

FONTE: TELLER et al. **Partitioning and ordering large radiosity computations**. Disponível em: <<http://www.cs.princeton.edu/~funk/sig94.pdf>>.

5.2.3 Método da Radiosidade – Equação Integral

Em todo sistema de iluminação baseado em conceitos físicos se considera a solução numérica de uma equação matemática que descreve o transporte da luz em um ambiente virtual. O termo radiosidade é uma quantidade radiométrica utilizada para quantificar a iluminação em uma cena. Os primeiros algoritmos de radiosidade empregados para síntese de imagens foram propostos por GORAL et al. (1984), COHEN et al. (1985) e NISHITA et al. (1985).

5.2.3.1 A Equação integral da radiosidade

Considerando um ambiente virtual consistindo de superfícies com áreas S ; na radiosidade uma restrição é feita nos seguintes dois modos de interação luz-matéria :

- a) emissão difusa espontânea de luz. A intensidade da luz difusa própria é uma função do local x nas superfícies, do comprimento de onda λ da luz emitida e do tempo t , e é dada por uma radiosidade própria $E(x, \lambda, t)$ (W/m^2);
- b) reflexão difusa da luz. A fração da luz incidente que é refletida é dada como uma função do local x nas superfícies, do comprimento de onda λ da luz emitida e do tempo t , e é dado pela refletância difusa $\rho(x, \lambda, t)$ (adimensional). A fração da energia de luz incidente que não é refletida, é absorvida, isto é, transformada em calor ou outra forma de energia.

5.2.3.2 Formulação direcional

Com os dois modos de interação luz-matéria, a iluminação total nas superfícies da cena serão difusas e dependerão da localização, comprimento de onda e tempo:

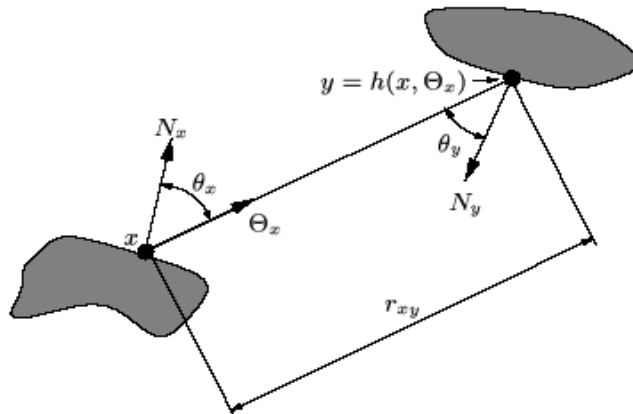
$$\mathbf{B}(x, \lambda, t) = \mathbf{E}(x, \lambda, t) + \frac{\rho(x, \lambda, t)}{\pi} \int_{\Omega_x} \mathbf{B}(h(x, \Theta_x), \lambda, t) \cos \theta_x d\omega_{\Theta_x} \dots\dots (5.2)$$

onde:

1. a radiossidade $\mathbf{B}(x, \lambda, t)$ (W/m²) expressa a intensidade da luz difusa de comprimento de onda λ no ponto x e no tempo t ;
2. Ω_x representa metade do hemisfério de direção Θ_x . θ_x é o ângulo entre a direção Θ_x e a superfície normal em x . $d\omega_{\Theta_x}$ representa a diferencial do ângulo sólido contendo a direção Θ ;
3. $h(x, \Theta_x)$ representa o ponto mais próximo na superfície S da cena que é visível de x na direção Θ_x .

A figura 5.3 representa a geometria de transporte da luz difusa.

FIGURA 5.3 - GEOMETRIA DE TRANSPORTE DA LUZ DIFUSA



Com não há mistura entre diferentes comprimentos de onda e também no tempo, pode-se retirar a dependência do comprimento de onda e o tempo, havendo uma equação por comprimento de onda e por posição no tempo. Esta equação expressa a radiossidade $\mathbf{B}(x)$ em x como a soma da radiossidade própria $\mathbf{E}(x)$ mais a fração correspondente da radiossidade incidente que é refletida. A radiossidade incidente é a integral ponderada sobre todas as direções Θ_x da radiossidade

$B(h(x, \Theta_x))$ do primeiro ponto $h(x, \Theta_x)$. A atenuação $\cos \theta_x$ leva em consideração a área aparente em x na direção Θ_x . Uma fração $\rho(x)$ da luz incidente é refletida e a divisão por π é necessária para a conservação da energia.

$$B(x) = E(x) + \frac{\rho(x)}{\pi} \int_{\Omega_x} B(h(x, \Theta_x)) \cos \theta_x d\omega_{\theta_x} \quad (5.3)$$

5.2.3.3 Formulação espacial

Fazendo-se uma transformação da integral sobre o hemisfério em x para uma integral sobre a superfície S da cena, chega-se à seguinte expressão:

$$B(x) = E(x) + \rho(x) \int_S G(x, y) B(y) dA_y \quad (5.4)$$

onde o núcleo geométrico é dado por:

$$G(x, y) = \frac{\cos \theta_x \cos \theta_y}{\pi r_{xy}^2} \text{vis}(x, y) \quad (5.5)$$

onde:

- a) dA_y representa a área da superfície diferencial no ponto $y \in S$;
- b) $\cos \theta_y$ é o cosseno do ângulo entre a linha conectora dos pontos x e y e a superfície normal em y ;
- c) r_{xy} é a distância entre os pontos x e y ;
- d) $\text{vis}(x, y)$ é uma constante que toma o valor igual a 1 quando x e y são mutuamente visíveis e o valor igual a 0 quando não são mutuamente visíveis;

O núcleo geométrico $G(x, y)$ depende somente da geometria da cena, não dependendo da radiação, da radiação própria ou da refletância. As equações (5.3) e (5.4) são chamadas equações da radiação contínuas. Na prática, considera-se $\rho(x) < 1$ para todas as superfícies da cena; isto é suficiente para garantir que essas equações tenham uma única solução.

A equação (5.4) pode ser escrita de forma mais compacta:

$$\mathbf{B}(x) = \mathbf{E}(x) + \int_S \mathbf{K}(x, y) \mathbf{B}(y) dA_y \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

onde

$$\mathbf{K}(x, y) = \rho(x, y) \cdot \mathbf{G}(x, y) \dots\dots\dots (5.7)$$

Na literatura de computação numérica, como em DELVES e MOHAMED (1985), KRESS (1989) e PRESS et al. (1992), citam-se duas classes de métodos que são recomendados para resolver equações integrais como a equação (5.4): método da quadratura e método da projeção (colocação e Galerkin). O método de Galerkin para radiação com aproximações de alta ordem foram propostas por HECKERT (1991) e ZATZ (1993). A idéia básica para resolver equações tal como a (5.4) é encontrar uma solução aproximada $\tilde{\mathbf{B}}(x) \approx \mathbf{B}(x)$ mais simples para avaliar em um ponto x . Uma forma conveniente para $\tilde{\mathbf{B}}(x)$ é definida como segue:

- a) as superfícies da cena para serem renderizadas assumem ser uma coleção de malhas i tais como triângulos ou quadriláteros convexos ou simplesmente superfícies curvas. Um esquema de numeração para as malhas é assumido, onde cada trecho é designado por um índice (i ou j);
- b) para cada trecho i , um número de formas primitivas independentes, chamadas de funções base, são definidas: $\psi_{i,\alpha}(x)$. As funções forma consideradas em i contêm todas as combinações lineares possíveis $f(x) = \sum_{\alpha} f_{i,\alpha} \psi_{i,\alpha}(x)$ das funções base. As funções base são independentes se nenhuma função base puder ser expressa como combinação linear das outras funções base.

Este método tenta encontrar uma melhor aproximação

$$\tilde{\mathbf{B}}(x) = \sum_i \sum_{\alpha} B_{i,\alpha} \psi_{i,\alpha}(x) \approx \mathbf{B}(x) \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

para a função radiossidade $\mathbf{B}(x)$ real, com uma discretização da cena nos trechos i e um conjunto de funções base $\psi_{i,\alpha}(x)$ para cada trecho (malha). Com funções base independentes, $\tilde{\mathbf{B}}(x)$ é completamente determinada por seus coeficientes $B_{i,\alpha}$.

5.2.3.4 Equação de radiossidade por Galerkin

No método de Galerkin os coeficientes de radiossidade $B_{i,\alpha}$ são obtidos substituindo $\mathbf{B}(x)$ por $\tilde{\mathbf{B}}(x)$ da equação (5.6):

$$\tilde{\mathbf{B}}(x) \approx \mathbf{E}(x) + \int_S \mathbf{K}(x, y) \tilde{\mathbf{B}}(y) dA_y \quad (5.9)$$

Considerando o produto escalar de funções no espaço tridimensional (D^3). A integral

$$\langle f, g \rangle = \int_D f(x)g(x) \quad (5.10)$$

é chamada produto escalar de duas funções.

Considerando um conjunto de funções ψ_i definidas em um domínio D (tridimensional). Toda função f em D pode ser aproximada por uma combinação

$$\sum_i f_i \psi_i \approx f(x) \quad (5.11)$$

com valores reais para os coeficiente f_i . Seus coeficiente podem ser calculados considerando o produto escalar de f e ψ_i .

$$\langle f, \psi_j \rangle \approx \sum_i f_i \langle \psi_j, \psi_i \rangle \quad (5.12)$$

Na prática os coeficientes f_i podem ser encontrados rapidamente como produto escalar:

$$f_i = \sum_j \langle f, \psi_j \rangle [\psi^{-1}]_{j,i} = \langle f, \tilde{\psi}_i \rangle \quad (5.13)$$

com:
$$\tilde{\psi}_i(x) = \sum_j [\psi^{-1}]_{j,i} \psi_j(x)$$

As funções $\tilde{\psi}_i$ são chamadas de bases duais das bases formadas por ψ_i . Uma melhor aproximação $\tilde{\mathbf{B}}(x)$ é obtida considerando-se (5.10) e (5.12) e que os coeficientes da base sejam idênticos, para cada i e α tem-se:

$$\int_S \tilde{\psi}_{i,\alpha}(x) \tilde{\mathbf{B}}(x) dA_x = B_{i,\alpha}$$

$$B_{i,\alpha} = \int_S \tilde{\psi}_{i,\alpha}(x) \mathbf{E}(x) dA_x + \int_S \tilde{\psi}_{i,\alpha}(x) \int_S \mathbf{K}(x, y) \tilde{\mathbf{B}}(y) dA_y dA_x$$

definindo

$$E_{i,\alpha} = \int_S \tilde{\psi}_{i,\alpha}(x) \mathbf{E}(x) dA_x$$

e

$$K_{i,\alpha;j,\beta} = \int_{S_i} \tilde{\psi}_{i,\alpha}(x) dA_x \int_S \mathbf{K}(x, y) \psi_{j,\beta}(y) dA_y dA_x$$

obtem-se o seguinte sistema de equações lineares:

$$B_{i,\alpha} = E_{i,\alpha} + \sum_{j,\beta} K_{i,\alpha;j,\beta} B_{j,\beta} \dots\dots\dots (5.14)$$

onde o fator $K_{i,\alpha;j,\beta}$ é chamado de fator de forma generalizado por malha.

5.2.3.5 Visão do método de radiosidade por Galerkin

O método de Galerkin para radiosidade consiste das seguintes etapas:

1. Discretização da cena para ser renderizada em malhas i . Em cada malha um conjunto de funções base $\psi_{i,\alpha}(x)$ é fixada;

2. Cálculo dos fatores de forma $K_{i,\alpha;j,\beta}$ para cada conjunto de malhas i e j .
Isto envolve o cálculo de integral dupla contendo a função de visibilidade entre o conjunto de pontos $x \in S_i$, e $y \in S_j$;
3. Solucionando o sistema de equações lineares de Galerkin conduz aos coeficientes $B_{i,\alpha}$;
4. Geração da imagem pela avaliação de $\sum_{i,\alpha} B_{i,\alpha} \psi_{i,\alpha}(x)$ para um ou mais pontos $x \in S$ visível de cada *pixel* da imagem.

5.2.3.6 Aproximações constantes de radiosidade

Usando as funções base (por malha)

$$\psi_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x \in S_i \\ 0 & \text{para } x \notin S_i \end{cases}$$

os seguintes resultados são obtidos:

$$\|\psi_i\|^2 = \int_{S_i} 1 dA_x = A_i$$

$$\tilde{\psi}_i(x) = \frac{1}{\|\psi_i\|^2} \psi_i(x) = \frac{1}{A_i}$$

$$K_{i,j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} K(x,y) dA_y dA_x = \rho_i F_{i,j}$$

A refletância $\rho(x) = \rho_i$ é assumida constante em cada malha. F_{ij} é o fator de forma:

$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} G(x,y) dA_y dA_x$$

Com essas considerações o sistema de equações de Galerkin se torna o sistema de equações da radiosidade clássico proposto por Goral et al. (1984):

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_j F_{ij} B_j \dots\dots\dots (5.15)$$

5.3 MÉTODO DE MONTE CARLO

A idéia fundamental do método de Monte Carlo é formular a solução de um dado problema matemático como um parâmetro de uma variável aleatória cuidadosamente escolhida. Pela amostragem desta variável aleatória com a ajuda de um computador, o parâmetro leva à solução do problema como uma estimativa. Mais freqüentemente, o valor médio, também chamado expectativa, da variável aleatória é estimada. Os conceitos de variável aleatória, expectativa, variância são brevemente revistos.

5.3.1 Características do Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma técnica particularmente eficiente para resolver integrais multi-dimensionais e integrais onde o integrando apresenta descontinuidade. Destaca-se como principais vantagens do método a extensa aplicabilidade e a simplicidade conceitual e como principal limitação a lenta convergência.

5.3.1.1 Extensa aplicabilidade

Em princípio, o método de Monte Carlo pode ser aplicado para resolver qualquer problema em que uma variável aleatória possa ser utilizada de modo que a solução do problema corresponda à expectativa (valor médio) da variável aleatória. Para que possa ser utilizada na prática, devem ser disponíveis algoritmos para amostrar a variável aleatória em um computador de maneira eficiente.

Muitas pesquisas no método de Monte Carlo foram concentradas nos projetos de eficiência de variáveis aleatórias para uma vasta variedade de problemas. Sistemas que possuem grande número de graus de liberdade e que são de interesse para a física, problemas aleatórios (estocásticos) por natureza, tais como problemas de transporte de radiação em projetos de reatores nucleares e em medicina, bem como em pesquisa operacional. Variáveis aleatórias eficientes e

apropriadas poderão ser utilizadas para problemas não estocásticos, tais como na resolução de integrais múltiplas e certos tipos de equações integrais e sistemas de equações lineares,

5.3.1.2 Simplicidade

Desde que uma variável aleatória e um algoritmo de amostragem apropriados tenham sido determinados, o cálculo por Monte Carlo sempre consistirá em utilizar repetidas amostras das variáveis aleatórias e médias das estimativas obtidas para cada amostra. Se a variância da variável aleatória é finita, quanto mais amostras forem utilizadas, a média de N amostras convergirá para a solução requerida para a precisão exigida.

Devido a sua concepção simples, o método de Monte Carlo é algumas vezes considerado como um método para evitar o uso de matemática complexa na resolução de problemas matemáticos mais complicados.

5.3.1.3 Baixa convergência

A taxa de convergência dos algoritmos de Monte Carlo usando amostras independentes é invariavelmente da ordem de $O(1/N^{1/2})$. Isto é bastante desencorajador: para estimar a solução com acurácia 10 vezes maior, 100 vezes mais trabalho é necessário.

Devido a isto, muitas pesquisas com o método tem se concentrado no desenvolvimento de técnicas específicas para a obtenção de um menor erro para um dado número de amostras, enquanto se conserva a taxa de convergência na ordem de $O(1/N^{1/2})$. Para exemplificar, cita-se três técnicas específicas encontradas na literatura:

1. técnicas de redução de variância, tais como importância amostral, amostragem estratificada (com número fixo de camadas) e amostragem correlacionada, objetivando a transformação de uma variável aleatória em uma equivalente com menor variância. Para um dado número de amostras independentes, o erro é reduzido por um

fator constante. A taxa de convergência permanece da ordem de $O(1/N^{1/2})$;

2. uma taxa de convergência mais rápida é obtida usando números de amostra seqüenciais mais uniformes, mas não independentes, como observou NIEDERREITER (1992), no método de *quasi-Monte Carlo* ou amostragem estratificada com aumento do número de camadas;
3. No método de Monte Carlo seqüencial, o cálculo é dividido em estágios de modo que a estratégia de amostragem no estágio subsequente é adaptada baseado nos resultados dos estágios anteriores. Foi demonstrado que isso pode resultar em convergência exponencial da ordem $O(e^{-\lambda N})$, conforme cita HALTON (1962), HALTON (1994) e SPANIER (1999).

Embora as bases para quasi-Monte Carlo e Monte Carlo sequencial sejam um tanto antigos, ambas são ainda tópicos de pesquisa. Muitos de seus problemas práticos e teóricos permanecem sem solução.

5.3.2 Método de Monte Carlo: um Método de Último Recurso

Devido à baixa convergência, o Método de Monte Carlo é geralmente aplicado como último recurso, quando todos os outros métodos analíticos ou numéricos falharam. A maioria das integrais unidimensionais podem ser resolvidas eficientemente usando métodos determinísticos. O método de Monte Carlo é o método utilizado para resolver integrais multidimensionais ($d > 20$) ou para integrandos não suaves em domínio complexo: a quantidade de trabalho necessário pelos métodos determinísticos é da ordem de $O(N^d)$, onde d representa a dimensão da integral. Os métodos determinísticos também supõem suavidade do integrando e são utilizados em domínios simples.

Para a solução de sistemas lineares, os métodos diretos como eliminação de Gauss requerem um trabalho da ordem de $O(n^3)$, onde n denota o tamanho do sistema, enquanto métodos numéricos iterativos, tais como iterações de Jacobi, requerem operações da ordem $O(n^2)$ para permitir encontrar uma

acurácia fixada para sistemas lineares tais como em radiosidade. Para sistemas lineares pequenos ou de tamanhos moderados, métodos diretos ou métodos numéricos iterativos são mais adequados, mas para certos tipos de sistemas grandes, bem como para resolver problema de radiosidade, em um ambiente com milhares de malhas ou mais, o método de Monte Carlo será mais adequado (CURTISS, 1956) e (HALTON, 1994).

5.3.3 Variáveis Aleatórias

Em geral uma variável aleatória é um conjunto (X, P_x) do resultado X com a probabilidade associada P_x . O significado de tal conjunto é que o resultado X será observado com a probabilidade P_x . As probabilidades P_x são números reais positivos com soma unitária. As variáveis aleatórias podem tomar uma das formas:

- (a_i, P_i) onde a_i é um número real ou vetor e P_i denota a probabilidade associada ao termo a_i ;
- $(f(x), P(x))$ onde $f(x)$ o valor de uma função real f definida em um domínio multi-dimensional possível. $x \in D$ é um ponto no domínio que ocorre com a densidade de probabilidade $P(x)$.

5.3.3.1 Expectativa de uma variável aleatória

A expectativa de uma variável discreta (a_i, P_i) com n resultados possíveis é expressa por:

$$E_P[a] = \sum_{i=1}^n a_i P_i \quad \dots\dots\dots (5.3.1)$$

A expectativa de uma variável aleatória contínua $(f(x), P(x))$ no domínio D , é expressa por:

$$E_P[f] = \int_D f(x) p(x) dx \quad \dots\dots\dots (5.3.2)$$

5.3.3.2 Variância da variável aleatória

É uma medida da não constância do resultado de uma variável aleatória e possui grande importância na análise de erro do método de Monte Carlo.

Para uma variável discreta (a_i, P_i) com n resultados possíveis:

$$V_P[a] = \sum_{i=1}^n (a_i - E_P[a])^2 P_i = E_P[a^2] - (E_P[a])^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 P_i - \left(\sum_{i=1}^n a_i P_i \right)^2 \quad \dots\dots\dots (5.3.3)$$

Para uma variável aleatória contínua ($f(x), P(x)$) no domínio D :

$$V_P[a] = \int_D (f(x) - E_P[f])^2 P(x) dx = \int_D f^2(x) P(x) dx - \left(\int_D f(x) P(x) dx \right)^2 \quad \dots\dots\dots (5.3.4)$$

5.3.3.3 Estimativa simples de Monte Carlo para somas e integrais

Para uma soma discreta $S = \sum_{i=1}^n a_i$: considere-se uma variável

$\hat{S} = (na_i, 1/n)$ na qual cada termo da soma tem igual probabilidade $1/n$. Verifica-se

que $E[\hat{S}] = S$. A variância é dada por $V[\hat{S}] = n \sum_{i=1}^n a_i^2 - S^2$. Este estimador

leva a um algoritmo simples para estimar uma soma S : primeiramente escolhe-se um termo aleatório a_i de S , onde cada termo tem a mesma chance $1/n$ de ser selecionado. Calcula-se na_i , do número de termos vezes o valor do termo selecionado, como uma estimativa da soma. Este caso de soma aparece nas séries de Newmann para a solução do sistema das equações de radiosidade.

Para uma integral multi-dimensional $I = \int_D f(x) dx$: considere-se uma

variável aleatória $\hat{I} = (v_D f(x), 1/V_D)$, onde V_D caracteriza o volume do domínio D .

Verifica-se que $E[\hat{I}] = I$ e $V[\hat{I}] = V_D \int_D f^2(x) dx - I^2$. Este estimador sugere que para

selecionar um ponto $x \in D$, onde cada ponto tem a mesma densidade de probabilidade $1/V_D$ de ser selecionado. $V_D \int f(x)$ retorna como uma estimativa da integral.

5.3.3.4 Estimadores secundários

Considere-se dois estimadores \hat{S}_1 e \hat{S}_2 produzindo as quantidades S_1 e S_2 como expectativa. Qualquer combinação linear $w_1 \hat{S}_1 + w_2 \hat{S}_2$ com pesos constantes w_1 e w_2 tem a expectativa:

$$E[w_1 \hat{S}_1 + w_2 \hat{S}_2] = w_1 E[\hat{S}_1] + w_2 E[\hat{S}_2] = w_1 S_1 + w_2 S_2 \quad \text{..... (5.3.5)}$$

A variância é dada pela equação (5.3.6) e a covariância pela equação (5.3.7) :

$$V[w_1 \hat{S}_1 + w_2 \hat{S}_2] = w_1^2 V[\hat{S}_1] + w_2^2 V[\hat{S}_2] + 2 w_1 w_2 \text{Cov}[\hat{S}_1, \hat{S}_2] \quad \text{..... (5.3.6)}$$

$$\text{Cov}[\hat{S}_1, \hat{S}_2] = E[\hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2] - E[\hat{S}_1] \cdot E[\hat{S}_2] \quad \text{..... (5.3.7)}$$

Se \hat{S}_1 e \hat{S}_2 são independentes a covariância é zero². Este resultado pode ser generalizado para qualquer número de estimadores como combinação linear.

2 Uma covariância nula é uma necessidade mas não é uma condição suficiente para a independência: existe estimadores dependentes que também têm covariância nula (ver p.e., KALOS e WHITLOCK (1986), p.13).

5.3.3.5 Acurácia do método de Monte Carlo

Há dois teoremas que explicam como o erro da média de N amostras independentes, de um estimador \hat{S} para uma quantidade S , se reduz com o aumento do número de amostras N . O erro é resolvido por meio destes teoremas, contudo, não são determinísticos mas probabilísticos.

O primeiro é a desigualdade de Chebyshev's: afirma que a probabilidade de qualquer amostra de uma variável aleatória \hat{S} , com expectativa finita $E[\hat{S}] = S$ e variância finita $V[\hat{S}]$, diverge de um valor maior do que $\sqrt{V[\hat{S}]/\delta}$ do valor S , é menor que δ , com δ um número positivo qualquer,

$$Prob\left(|\hat{S}-S| \geq \sqrt{\frac{V[\hat{S}]}{\delta}}\right) < \delta \quad \dots\dots\dots (5.3.8)$$

Desde que $V[\hat{S}_N] = V[\hat{S}]/N$ para uma média de N amostras independentes de \hat{S} , obtém-se:

$$Prob\left(|\hat{S}_N-S| \geq \sqrt{\frac{V[\hat{S}]}{N\delta}}\right) < \delta \quad \dots\dots\dots (5.3.9)$$

Com uma probabilidade fixada δ , a média de N variáveis independentes estará contida em intervalos de tamanho que diminuem na razão de $1/\sqrt{N}$, com o aumento do número de amostras N .

A afirmação mais forte sobre a acurácia do cálculo de Monte Carlo é dado pelo teorema do limite central de probabilidade. Este teorema afirma que a média de N amostras independentes de qualquer variável aleatória \hat{S} , com variância finita $V[\hat{S}]$ e com expectativa $E[\hat{S}] = S$, é assintoticamente normal distribuída quando $N \rightarrow \infty$, e que no limite para N grande:

$$Prob\left(a\sqrt{\frac{V[\hat{S}]}{N}} \leq |\hat{S}-S| \leq b\sqrt{\frac{V[\hat{S}]}{N}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{t^2}{2}} dt \dots\dots\dots (5.3.10)$$

O valor da fórmula do lado direito é encontrado em tabelas.

5.3.3.6 Estimadores consistentes e tendenciosos

Um estimador com expectativa que difere da quantidade calculada é chamado de um estimador tendencioso (*biased*). A quantidade para a qual o estimador está “errado” é chamado tendência (*bias*); $B[\hat{S}] = E[\hat{S}] - S$. O erro total resultante estimado é caracterizado pela soma das tendências e da raiz quadrada da variância.

Um estimador com variância finita e cuja tendência desaparece no limite para um grande número de amostras é denominado de estimador consistente.

5.3.3.7 Estimativa da variância

A variância $V[\hat{S}_N]$ pode ser estimada com as mesmas amostras independentes $N, s_i; i = 1, \dots, N$, utilizadas para calcular $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i$ de S:

$$V[\hat{S}_N] \approx \frac{1}{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \right)^2 \right] \dots\dots\dots (5.3.11)$$

5.3.3.8 Técnicas de redução da variância

O melhor caminho para entender o aumento da eficiência dos algoritmos de Monte Carlo é transformar um ou mais estimadores básicos, tais como a soma ou integração apresentadas, em um estimador equivalente com variância mais baixa. Para se obter uma diminuição da variância, para uma dada acurácia e

confiança, poucas amostras serão necessárias para calcular a quantidade de interesse. Uma excelente fonte de informação das técnicas de redução da variância poderão ser encontradas em vários textos clássicos de Monte Carlo, como por exemplo em KAHN (1956).

5.3.3.8.1 Importância amostral

A idéia básica da importância amostral é mudar a distribuição de probabilidade de um estimador, de tal maneira que cada amostra do estimador alterado produzirá uma estimativa igualmente aproximada.

No caso da estimativa de Monte Carlo de uma soma $S = \sum_{i=1}^n a_i$, significa amostrar termos da soma para os quais cada termo a_i tenha a probabilidade P_i , não necessariamente $P_i = 1/N$. A variável aleatória é da forma $\hat{S}^I = (a_i/P_i, P_i)$. As probabilidades P_i devem ser escolhidas de maneira tal que a variância

$$V[\hat{S}^I] = \sum_{i=1}^N \frac{a_i^2}{P_i} - S^2 \quad \dots\dots\dots (5.3.12)$$

seja mínima. Boas reduções de variância podem ser obtidas tomando-se P_i aproximadamente proporcional a a_i . Na prática, as probabilidades devem preencher três condições:

1. elas devem ser normalizadas: $\sum_{i=1}^n P_i = 1$;
2. a seleção de um termo a_i com uma probabilidade P_i não pode ser muito complicado;
3. a probabilidade P_i nunca poderá ser nula se $a_i \neq 0$: todo termo não nulo de uma soma terá uma probabilidade não nula (OWEN e ZHOU,1999).

5.3.3.8.2 Ponderação amostral

O segundo requisito acima pode ser flexibilizado: há meios para se obter (aproximadamente) o mesmo resultado dado na importância amostral, sem a necessidade de utilizar uma distribuição de probabilidade (P_i) muito complicada. Esta técnica recebe muito pouca atenção na maioria dos textos de Monte Carlo mas é importante registrar que é uma técnica útil em iluminação global.

5.3.3.8.3 Amostragem de variáveis aleatórias

A amostragem de uma variável aleatória geralmente consiste de duas etapas: 1) selecionar um dos dois possíveis resultados (eventos ou estado) de uma variável aleatória; 2) calcular o valor associado com o evento ou estado selecionado. No caso das somas $S = \sum_{i=1}^n a_i$, é necessário selecionar um ou mais índices i_k , de maneira que a probabilidade de seleção para cada possível índice corresponda a dada probabilidade P . No caso de integrais, um ponto x precisa ser selecionado no domínio D , tal que a probabilidade de selecionar um ponto de uma região infinitesimal ao redor de x corresponde a uma dada função densidade de probabilidade $P(x)$.

5.3.3.8.4 Inversão da distribuição cumulativa

A função distribuição cumulativa de probabilidade (fcp) correspondente a $P_i = 1, \dots, n$ é $P'_i = \sum_{j=1}^i P_j$. Desde que P_i seja normalizado, $P'_n = 1$. Toma-se $P'_0 = 0$. A seleção aleatória de um índice i com probabilidade P_i , pode ser determinado pela geração de um número aleatório uniforme $\xi \in (0,1)$ e encontrando o índice i para o qual :

$$P'_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} P_j < \xi \leq P' = P'_{i-1} + P_i \dots\dots\dots (5.3.13)$$

5.3.3.8.5 Amostragem estratificada

A idéia básica é tomar amostras mais uniformes, subdividindo-se o domínio a ser amostrado em um número de estratos (camadas). Frequentemente, este tipo de técnica precisa ser combinada com a de importância amostral. Uma prática recomendada é tomar amostras uniformemente distribuídas em estratos de tamanhos iguais e com iguais números de amostras em cada estrato. Estas amostras uniformes são transformadas na inversa da função de distribuição cumulativa de probabilidade da importância amostral. Para integrais unidimensionais, há uma taxa de convergência da ordem de $O(1/N)$ ao invés de $O(1/\sqrt{N})$.

O número de estratos com tamanhos iguais aumenta exponencialmente com a dimensão, por isso esta técnica não é praticável em dimensões mais altas.

5.3.3.8.6 Rejeição amostral

O termo rejeição amostral indica uma classe de técnicas de amostragem em que tentativas de amostras são propostas e testadas por aceitabilidade até que seja encontrada uma amostra aceitável.

Técnicas de amostragem para funções distribuídas de probabilidade podem ser desenvolvidas e que não precisam atender ao correspondente de distribuição cumulativa de probabilidade (fcd).

A desvantagem desta técnica reside no fato que o custo de geração das amostras é muito alto.

5.4 MÉTODO DE *RAY TRACING*

A técnica *ray tracing* de renderização, foi originalmente proposto por WHITTED (1980) e COOK et al. (1984). A técnica simula as interações globais de maneira explícita, os caminhos infinitos dos feixes de energia ou raios de luz, e suas interações entre os objetos em uma cena (WATT, 1996).

Esta técnica de renderização segue “os raios vistos” de um foco virtual de um olho ou câmera através dos *pixels* dentro de um plano de imagem imaginário do meio. Estes raios geométricos se cruzam matematicamente com o modelo geométrico. Raios adicionais são “gerados” para as fontes de luz e outras superfícies para determinar as contribuições diretas e indiretas para a iluminação nos seus cruzamentos em um processo recursivo.

A técnica original de renderização usava um algoritmo estritamente determinístico, conforme introduzido por WHITTED (1980). Pode-se dizer que o resultado obtido da renderização será o mesmo, independentemente do número de repetições do experimento.

Em contraste ao método original, um algoritmo estocástico emprega processos aleatórios, que quando repetidos geralmente gerarão resultados com diferenças insignificantes ou pequenas. Embora isto pareça um tanto desconcertante, o fato é que a luz em sua trajetória possui natureza não determinística: os fótons estão animados aleatoriamente e somente o enorme número de fótons é que dá a luz a aparência de estabilidade em um ponto qualquer.

O método de Monte Carlo tem sido utilizado nos métodos de *ray tracing* desde o método clássico ao método de técnicas híbridas, cita SHIRLEY et al. (1996).

Este enfoque é dado no programa Radiance.

5.5 RADIANCE

O Radiance é um conjunto de ferramentas para visualização no ambiente virtual. Consiste de mais de 50 ferramentas, muitas das quais não são encontradas em qualquer outro programa. O que distingue o Radiance de outros programas de renderização é a sua capacidade de prever a realidade.

5.5.1 Fotorealismo e Visualização de Iluminação

Renderização é o processo de tomar uma descrição geométrica espacial, (três dimensões) e criar uma imagem bidimensional de uma vista específica. Chama-se uma imagem fotorealista àquela que parece tão real quanto uma fotografia. Há ainda uma grande diferença entre algo que parece real e algo que é uma boa reprodução da realidade. Pode-se criar uma renderização em programas comerciais CAD, de acordo com suas expectativas. Mas pouco ou nada se aprende sobre o processo de iluminação caso não se tenha uma real confiança no que está sendo representado (renderizado) em relação ao que se apresenta como realidade.

A finalidade do estudo da luz do dia (também a artificial) é determinar o quanto uma edificação permite luz em seu interior. Esse estudo pode ser fotorealista, mas não apresenta acurácia, pois não está baseado em conceitos físicos reais. A luz não interage no sistema de renderização do mesmo modo que no meio ambiente (real), assim, o resultado não condiz com a realidade. Haveria necessidade de se introduzir fontes de luz complementares, fontes que na realidade não existem dentro do modelo, para se obter um resultado que se apresenta razoável.

5.5.2 Requisitos para Visualização de Iluminação

O primeiro requisito para um programa de visualização de iluminação é que ele resolva o problema de iluminação global. Especificamente, ele deve calcular os caminhos da luz entre as várias superfícies dentro do modelo espacial. Se quantidades absolutas são desejadas na simulação, ele deve executar seus

cálculos em unidades físicas, tais como unidades de radiância ou excitância radiante (radiosidade).

O segundo requisito é que a iluminação local do modelo concorde com a realidade física. Esse modelo descreve o caminho da luz emitida, refletida e transmitida por cada superfície. Muitos programas de visualização são baseados no método da radiosidade que modela superfícies como difusores lambertianos ideais. Isso é uma aproximação. Os melhores métodos incluem reflexões difusas direcionais e especulares, como no programa empregado.

O mais importante requisito implica em que o modelo de iluminação local inclua uma precisa simulação da emissão das fontes de luz, porque se isto não for feito corretamente, não se poderá prever o resultado.

5.5.3 Capacidades Intrínsecas do Programa

O Radiance contempla as seguintes funcionalidades:

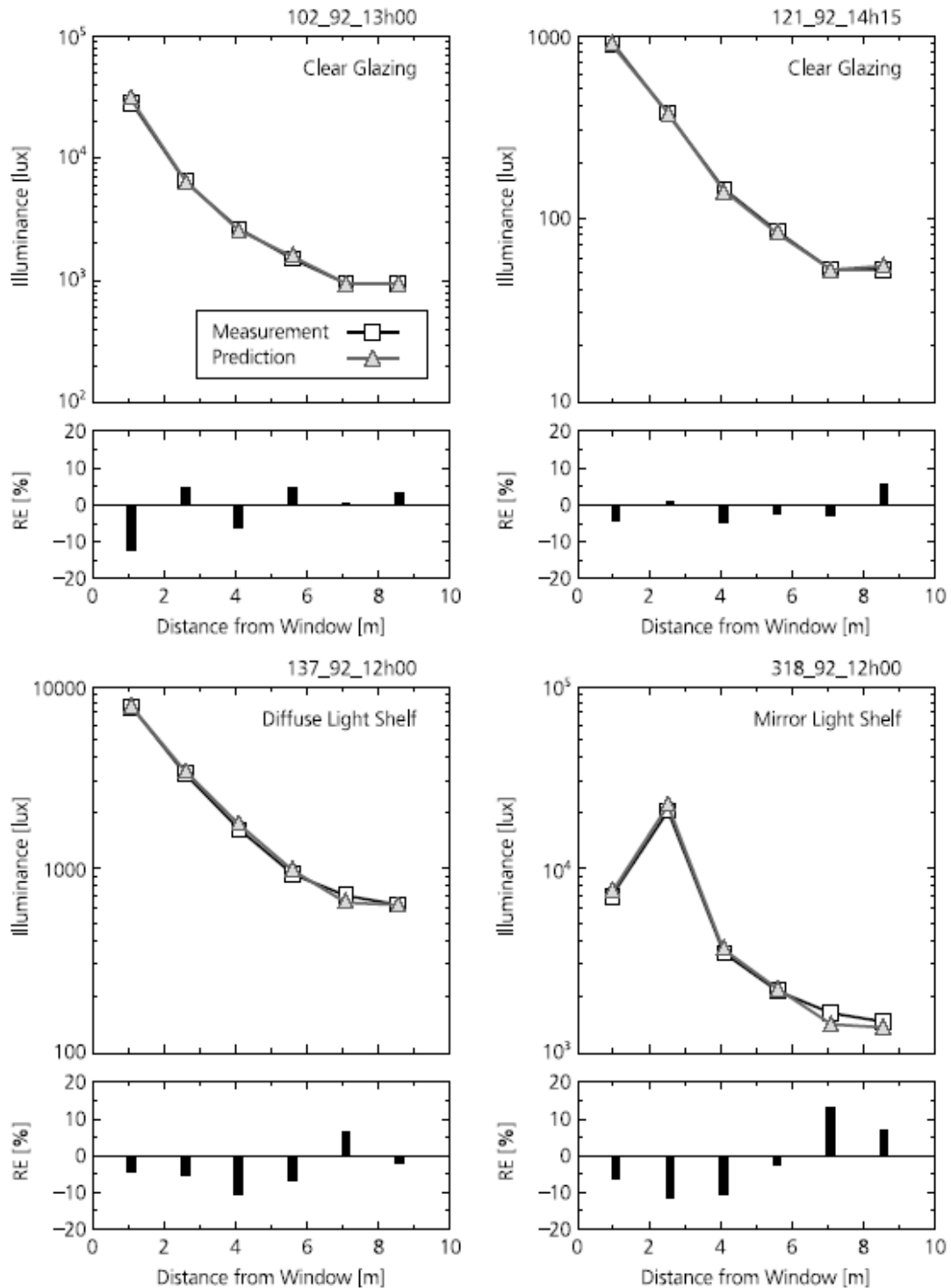
- a) calcula com precisão a luminância e a radiância. A luminância é a unidade fotométrica que é melhor correlacionada com o que é visto pelo olho humano. A radiância é o equivalente da luminância. O software produz acurada previsão destes valores para o modelo do meio estudado, permitindo o cálculo de outras medidas derivadas e imagens sintéticas (renderização);
- b) modela tanto a luz elétrica como a luz do dia. O programa foi desenvolvido para prever iluminação em geral, isto é, inclui todas as fontes de iluminação importantes. Para os espaços arquitetônicos, as fontes críticas são a luz elétrica e a luz do dia. O modelamento da luz elétrica significa usar dados de distribuição da luz (fonte/luminárias) que foram medidas ou calculadas previamente (laboratório). O modelamento da luz do dia significa a radiação inicial proveniente do sol e a sua redistribuição através de várias reflexões entre as superfícies e as dispersões provenientes do céu;
- c) permite uma variedade de modelos de refletância. A acurácia no cálculo da luminância ou radiância depende principalmente do modelo

reflectivo da superfície, porque isso determina quanto da iluminação devida à luz retorna ao olho. O programa inclui 25 tipos de materiais de superfícies, uma das quais é a função de distribuição bidirecional de refletância-transmitância (*BRTDF*). Cada tipo de material possui vários parâmetros que determinam seu comportamento e em adição, cada material básico pode ser combinado com 12 diferentes padrões e tipos de texturas. Muitos destes materiais são baseados em aproximações na interação da física da luz com superfícies particulares;

- d) suporta geometria complexa;
- e) utiliza dados de geometria desenhados em programas de desenho (*CAD*), sem modificá-los. O único requisito no programa é que haja alguma maneira de associar materiais com as superfícies.

MARDALJEVIC (1995), propôs um estudo comparativo entre o programa Radiance e resultados experimentais, da iluminação de um ambiente, sob condições naturais (luz do céu e solar), com o objetivo de atestar a acurácia do programa. Primeiramente, considerou-se horários e pontos de medição diferentes e, janela com vidros limpos. Posteriormente considerou prateleiras de luz difusa e luz especular. O resultado encontra-se na figura 5.5.1.

FIGURA 5.5.1 - REPRESENTAÇÃO DA COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE O PROGRAMA RADIANCE E MEDIÇÕES REAIS SOB CONDIÇÕES DE LUZ DO DIA.



FONTE: MARDALJEVIC, 1995

5.5.4 Radiance – Ferramentas e Conceitos

O mecanismo de simulação do Radiance, conforme WARD e SHAKESPEARE (1998), usa uma abordagem híbrida entre o método de Monte Carlo (estocástico) e o de *ray tracing* (determinístico). O cálculo pode ser dividido em três partes principais: a componente direta, a componente indireta especular e a componente indireta difusa.

A componente direta consiste na luz que chega à superfície diretamente da fonte emissora ou de uma ou mais transferências da luz provenientes de superfícies especulares perfeitas. Uma lista de fontes é usada e ordenada pela contribuição potencial para minimizar o número de raios necessários para o teste de visibilidade. A técnica de amostragem de Monte Carlo é então associada com a subdivisão adaptativa das fontes mais importantes para o cálculo mais preciso do efeito de penumbra.

A componente indireta especular consiste na luz que chega à superfície de outras fontes com uma reflexão ou transmissão direcional determinada. A transferência especular perfeita é utilizada redirecionando o raio em uma apropriada direção, refletida ou transmitida. A transferência especular rugosa é modelada com a amostragem por Monte Carlo de uma direção transmitida ou refletida.

A componente indireta difusa consiste na luz que chega à superfície não possuindo direção preferencial na reflexão ou transmissão. A natureza desta componente requer centenas de direções em seu exame para permitir uma ordem razoável na estimativa de Monte Carlo.

O Radiance simula a iluminação sintetizando imagens de modelos geométricos tridimensionais de espaços físicos. O modelo de entrada descreve cada forma da superfície, tamanho, localização e composição. Um modelo geralmente contém milhares de superfícies e normalmente é gerado por um programa CAD. Além de polígonos (planos), o programa modela esferas, cones e superfícies complexas por meio de formas primitivas.

5.5.5 Análise das Características do Programa

Algumas características do Radiance podem ser enumeradas:

1. geometria da cena: é o modelo usado para representar as formas dos objetos dentro do ambiente e os métodos de entrada e compilação dessas informações;
2. superfície dos materiais: é o modelo geométrico utilizado para caracterizar a interação entre a luz e as superfícies;
3. simulação da luz e renderização: é a técnica usada para calcular a propagação da luz no ambiente e a natureza dos valores calculados;
4. manipulação da imagem e análise: é o processamento da imagem e a capacidade de conversão;
5. integração: interconexão, automação de renderização, processo de análise, união com outros sistemas e cálculo do ambiente.

5.5.6 Geometria da Cena

A geometria da cena dentro do programa de renderização é modelada usando a representação do contorno de três classes de superfícies básicas:

1. polígonos: um polígono plano com n -lados e com no mínimo três lados. Um polígono pode ser côncavo ou convexo assim definido pela sua superfície. A orientação da superfície é determinada pela ordem dos vértices, segundo a regra da mão direita;
2. esfera: definida por um centro e um raio;
3. cone: a família de cones no Radiance inclui os cones propriamente dito, cilindros e anéis (discos com buracos)

Outro elemento é :

Source (fonte): tipo geométrico distante tendo uma direção e um ângulo sólido. Pode representar o sol ou um ponto no céu.

5.5.7 Comandos Internos de Geração

O programa Radiance possui uma variedade de comandos internos para geração que podem ser melhor analisados em LARSON (1991). Cita-se alguns comandos para exemplificar:

- a) *xform*: escala, rotaciona e move objetos e descrição de cena;
- b) *genbox*: cria um paralelepípedo que pode ter cantos modificados;
- c) *genprism*: cria um prisma, extrudado de um polígono específico ao longo de um valor dado. Pode ter cantos arredondados;
- d) *genrev*: gera uma superfície de revolução baseado em uma função definida pelo usuário com a resolução desejada;
- e) *genworm*: gera uma variável raio “worm” ao longo de uma curva paramétrica especificada pelo usuário no espaço tridimensional;
- f) *gensurf*: gera uma superfície paramétrica definida por uma função do usuário ou conjunto de dados;
- g) *gensky*: gera uma descrição do céu, claro, intermediário, nublado ou uniforme com ou sem sol;
- h) *Replmarks*: substitui polígonos marcadores especiais com descrições de objetos. Útil para separar fontes de luz ou detalhes geométricos para manipular sistemas CAD;

Além destes comandos de superfície primitivos, o programa possui geradores, manipuladores e tradutores.

5.5.8 Materiais de Superfície

Alguns tipos de materiais são:

- a) *ligh*: é utilizado em superfícies emissoras de luz (que atuam como fonte de luz). Luzes são geralmente visíveis na renderização, em oposição a muitos sistemas que empregam fontes não físicas;
- b) *illum*: é um tipo de luz especial para fontes secundárias. Um exemplo de uma fonte secundária é uma janela onde a luz do céu penetra no

ambiente. Marcando a janela como *illum* pode aumentar a qualidade da renderização, sem aumentar o tempo de cálculo;

- c) *plastic*: apesar de seu nome soar artificial, a maioria dos materiais entram nessa categoria. Uma superfície *plastic* tem uma cor associada com a radiação refletida difusamente, mas a componente especular não é colorida. Esse tipo é usado para materiais tal como plástico, superfícies pintadas, madeira;
- d) *metal*: é exatamente como o *plastic*, exceto que a componente especular é modificada pela cor do material;
- e) *dielectric*: superfície que refrata e reflete radiação e é transparente. Inclui vidro, água e cristal. Uma superfície de vidro fino é melhor representada usando o tipo *glass*, que calcula reflexões internas múltiplas;
- f) *trans*: material que transmite e reflete luz com componente difusa e especular. Esse tipo é apropriado para materiais translúcidos finos;
- g) *BRTDfunc*: é o material programável mais geral, providenciando entradas para reflexão e transmissão difusa, especular pura, direcional difusa. Cada componente tem uma cor associada (programável) e as refletâncias podem ser diferentes quando vistas de cada lado da superfície.

Outros materiais empregados são variações dos anteriores, alguns usando dados ou funções para modificar a componente direcional difusa. Todos os tipos de materiais também aceitam zero ou mais padrões ou texturas, que modificam a cor local ou orientação da superfície de acordo com os procedimentos ou dados definidos pelo usuário.

A versão utilizada só aceita os tipos *plastic* e *metal*, quando o usuário define os materiais.

5.5.9 Simulação de Luz e Renderização

A luz obedece a geometria dos raios de um ponto de medida (ponto de vista) na cena e retorna para as fontes de luz, extensão do algoritmo de WHITTED (1980). Este processo falha para interreflexões difusas entre objetos, as quais são aproximadas por um termo ambiente constante na equação de renderização. Sem um completo cálculo da iluminação global, um método de renderização não pode reproduzir valores precisos sendo portanto de uso limitado como programa de previsão.

Uma renderização acurada de ambientes reais requer um tratamento das fontes de luz de maneira muito cuidadosa, pois elas são os pontos iniciais de toda a iluminação. Se a componente direta não é calculada adequadamente, o resultado encontrado não tem sentido físico real.

Alguns programas principais para renderização e suas principais funcionalidades são listadas abaixo:

- a) *rview*: programa interativo para visualização da cena. Programa primário de visualização, checagem de inconsistências, disposição da luz e seleção de pontos de observação;
- b) *rpict*: programa de renderização que produz imagem de alta qualidade sem filtragem. Uma imagem do Radiance é uma coleção bidimensional de valores de radiância estimados da análise e da visualização da iluminação;
- c) *rtrace*: este programa calcula valores individuais da radiância ou irradiância provenientes da análise da iluminação;
- d) *dayfact*: cálculo dos valores da iluminância e fatores de luz do dia em um plano de trabalho determinado;
- e) *mkillum*: calcula valores de radiância da energia que entra através de janelas, da luz do céu, ou “outras fontes secundárias”;
- f) *findglare*: programa que localiza e quantifica fontes brilhantes em uma cena;

- g) *glare*: calcula ou simplifica a geração e interpretação de resultados provenientes do programa *findglare*. Produz seus valores e imprime os resultados;
- h) *glarendx*: converte o resultado de *findglare* para índices de brilho.

5.5.10 Manipulação de Imagem e Análise

Em uma imagem criada pelo Radiance os valores do *pixel* são números reais correspondendo a quantidades físicas de radiância (W/sterradiano.m^2). O início (cabeçalho) ASCII contém informações pertinentes aos comandos de geração, opções de vista, ajustes de exposição e valores de cores que podem ser usadas para recuperar parâmetros e outras informações necessárias para vários tipos de processamento de imagem. Os mais importantes manipuladores de imagem do Radiance são:

- a) *falsecolor*: converte uma imagem em uma representação de valores de luminância com a criação de uma correspondente legenda para fácil interpretação;
- b) *pcomb*: manipula valores de *pixel*;
- c) *pcompos*: faz a composição de imagens em uma montagem desejada;
- d) *pcond*: condiciona a saída das imagens para um dispositivo específico;
- e) *pextrem*: encontra e retorna o mínimo e máximo valor de *pixel* e sua localização;
- f) *pflip*: translaciona figuras da esquerda para a direita e de cima para baixo;
- g) *pinterp*: utilizado para calcular os quadros e aumentar a velocidade das animações;
- h) *protate*: gira a imagem criada noventa graus no sentido horário;
- i) *pvalue*: conversor de imagem criada pelo Radiance para outros formatos como o ASCII possibilitando manipulações;
- j) *ximage*: mostra as imagens criadas. Para sistema operacional UNIX ou Linux.

5.5.11 Integração

O programa Radiance (usado em máquinas UNIX) possui ferramentas que o integra a sistemas CAD, como por exemplo:

- a) *Adeline*: uma coleção de CAD, simulação e visualização para sistema DOS;
- b) *ddrad*: interface de usuário baseada no AutoCAD, que inclui a habilidade para exportar geometria e definir materiais para o programa;
- c) *GENESYS*: um pacote de desenho de iluminação, para máquinas DOS. Inclue versão do Radiance para DOS.

5.5.12 Cálculo Direto

Devido a certos objetos ou superfícies contribuírem mais significativamente do que outros - as propriedades físicas de cada material componente do objeto ou superfície são distintas entre si, eles podem ser tratados como fontes de luz no “ cálculo direto”.

Da equação da radiância :

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = L_e + \int \int L_i(\theta_i, \phi_i) * f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) * |\cos \theta_i| * \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \dots\dots$$

..... (5.5.1)

A função descrita é o valor de um raio em uma dada direção expresso em termos de luminância ou radiância. O lado direito significa a soma da radiação emitida e a convolução de toda a radiação incidente, levando-se em conta a função transmitância (f_r) – refletância para a superfície, onde:

- L_e : radiância emitida pelo corpo;
- $L_i(\theta_i, \phi_i)$: é o fator de distribuição luminosa incidente;
- $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$: função distribuição refletância-transmitância bidirecional (*BRDF*). Possui a unidade sterradiano^{-1} .

Uma solução puramente determinística para a integral traçaria sempre a mesma direção para o raio. Uma solução estocástica para a integral deveria traçar raios em direções aleatórias, ponderados pela função $f_r(BRTDF)$ e outros termos no integrando.

A chave para resolver com eficiência essa equação está na eliminação dos lugares conhecidos onde a radiância incidente, L_i , ou a função refletância de superfície, f_r , seja grande.

Verifica-se que fontes de luz geralmente representam grandes valores em L_i . Na maioria dos casos as partes relativas ao cálculo direto incluem fontes de luz ou outros objetos que refletem ou redirecionam luz e que podem ser calculados a priori.

O programa Radiance possui algoritmos desenvolvidos para evitar problemas como ruído e aumentar a eficiência do cálculo, melhorando o tempo de processamento. Estes algoritmos desenvolvidos possuem as seguintes características:

- a) teste de sombra (*shadow testing*) seletivo: para evitar o cálculo do crescimento linear com o número de fontes de luz, o programa arruma (ordena) todo o potencial da contribuição direta para cada ponto avaliado e envia raios de sombra necessários para dada acurácia. O resultado é que a velocidade é aumentada por um fator de 2 a 10 vezes em meios com muitas fontes de luz;
- b) subdivisão adaptativa de fontes: fontes de grandes áreas são adaptativamente subdivididas em algumas menores, baseando-se na distância do ponto teste. Isto evita erros devidos ao ângulo sólido e penumbra sem introduzir amostragem excessiva para pontos mais distantes;
- c) cálculo de fonte de luz virtual: reflexões de fontes de espelhos e outras superfícies são gerenciadas por “um cálculo de fonte de luz virtual” que posiciona o caminho virtual das fontes de luz e segue os raios através de reflexões apropriadas e refrações para encontrar as fontes originais. Gerenciamento cuidadoso dessas posições virtuais previne que o cálculo saia de controle.

5.5.13 Cálculo Indireto

No programa Radiance, o cálculo indireto inclui todas as fontes de iluminação não consideradas durante o cálculo direto. Isto inclui luz refletida e transmitida em direções especulares (raios refletidos e refratados) bem como luzes difusas entre as superfícies e em todas as direções. Matematicamente, as contribuições diretas representam picos identificados a priori pela função L_i , da equação da radiância, repetida abaixo:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = L_e + \int \int L_i(\theta_i, \phi_i) * f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) * |\cos \theta_i| * \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \dots\dots (5.5.1)$$

A aproximação básica para o tratamento das reflexões difusas e especulares é o envio de um pequeno número de raios para amostrar a componente especular, seguido por um grande número de raios para amostrar a componente difusa. Para evitar o crescimento no cálculo da parte difusa, valores são colocados em estruturas de dados para serem reutilizados para pontos vizinhos. Uma breve explicação de como as duas estratégias trabalham são dadas a seguir:

- amostragem especular: um raio é enviado em cada direção especular designada. Se a componente é pura (reflexão ideal ou refração ideal), a direção é completamente determinada. Se a componente apresenta uma especularidade mais grosseira (superfície rugosa), a significância amostral por Monte Carlo é usada para determinar a direção da amostra atual e a contribuição das fontes de luz são computadas separadamente como parte da componente direta;
- armazenamento da irradiância indireta: uma vez que a luz em um ponto provém de reflexões indeterminadas do meio ambiente e contribui para a reflexão difusa no ponto, há pouca escolha a não ser amostrar sobre o hemisfério inteiro para este ponto.

5.5.14 Amostragem Especular

No Radiance, diz-se especular qualquer componente de reflexão ou transmissão de superfície não-lambertiana. Isto inclui refração através de meio dielétrico, por exemplo vidro sólido, bem como uma reflexão em superfície opaca polida, similar à reflexão em espelho ou à dispersão direcional de um material translúcido.

Todo os materiais no Radiance têm, no mínimo, o potencial de possuir alguma componente especular. Uns poucos materiais, tais como *dielectric* e *glass*, são puramente especulares, e não requerem cálculos diretos nem indiretos das componentes difusas.

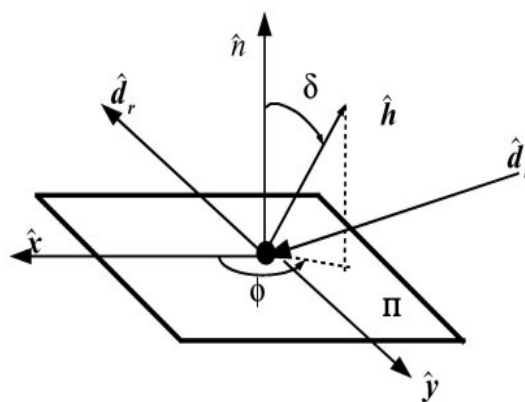
Nos casos mais comuns, de superfícies com algum componente lambertiano e algum especular, a avaliação torna-se mais complicada. Parte da integral é computada no cálculo direto, após a função distribuição refletância-transmitância bidirecional f_r (*BRTDF*) ser avaliada na direção de cada fonte de luz (ou subfonte). No programa Radiance a refletância é dividida em até seis componentes, dependendo do material específico primitivo usado.

No material tipo *plastic*, por exemplo, duas componentes são utilizados como modelo . Uma das componentes de reflexão é lambertiana (uniforme em todas as direções) e outra é uma reflexão especular ou especular rugosa. A componente especular representa um pico na função f_r (*BRTDF*), chegando mesmo a ser uma singularidade (função delta de Dirac). Pode-se remover esta variação amostrando separadamente essa componente. O programa faz isso enviando um raio simples em uma direção distribuída em torno de um ângulo de reflexão com um valor especificado pela rugosidade do material. Se a rugosidade é zero, o raio especular possui a mesma direção de reflexão e como resultado obtém-se uma imagem clara na superfície amostrada. Se a rugosidade é diferente de zero, é tomada uma direção aleatória usando importância amostral por Monte Carlo, para conseguir uma reflexão acurada. Para finalizar, a componente difusa lambertiana é então calculada com um valor ambiente constante, pela formulação de WHITTED (1980) ou usando amostragem por Monte Carlo. Outros materiais seguem uma

estratégia similar, enviando raios nas direções especulares e então usando o cálculo da interreflexão difusa para estimar quaisquer componentes difusas.

A figura 5.5.1a mostra um diagrama das direções dos raios incidentes e refletidos, que pode explicar o modelo de reflexão e geração de direções amostrais para reflexão especular rugosa.

FIGURA 5.5.1a - DIAGRAMA DE REFLEXÃO DO RAO



LEGENDA

- \hat{d}_i – vetor unitário direcional incidente
- \hat{d}_r – vetor unitário direcional refletido
- \hat{n} – normal à superfície Π
- \hat{h} – vetor unitário direcional bisettriz
- ϕ – ângulo azimutal

FONTE: WARD, G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with radiance**: the art and science of lighting visualization. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, p.531.1998.

Para um material isotrópico, tal como plástico ou metal, o modelo de reflexão Gaussiano é definido por:

$$f_{r,iso}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s * \frac{1}{\sqrt{(\cos \theta_i * \cos \theta_r)}} * \frac{e^{(-\tan^2 \delta / \alpha^2)}}{4 \pi \alpha^2} \dots\dots\dots (5.5.2)$$

onde :

- ρ_d é a refletância difusa;
- ρ_s é a refletância especular;
- δ é o ângulo entre a superfície normal \hat{n} e o vetor bisettriz entre o ângulo incidente e o refletido \hat{h} ;
- ϕ é o ângulo azimutal
- α é o desvio padrão da inclinação da superfície.

Para obter os ângulos δ e ϕ são gerados dois números aleatórios uniformemente distribuídos, u_1 e u_2 no intervalo (0,1]. Então usam-se as equações derivadas abaixo, usando técnicas de inversão de Monte Carlo padrão (RUBENSTEIN, 1981):

$$\delta = \alpha [-\log(u_1)]^{1/2} \dots\dots\dots (5.5.3)$$

e

$$\phi = 2\pi u_2 \dots\dots\dots (5.5.4)$$

onde:

- ϕ é o ângulo azimutal;
- u_1 e u_2 são variáveis aleatórias uniformes no intervalo (0,1].

O programa Radiance emite um raio para cada direção especular para minimizar o número de amostras geradas.

Para materiais não isotrópicos tal como *plastic2* e *metal2*, a equação é modificada tornando-se :

$$f_{r, aniso}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \cdot \frac{1}{\sqrt{(\cos \theta_i \cdot \cos \theta_r)}} \cdot \frac{e^{(-\tan^2 \delta \cdot (\cos^2 \phi / \alpha_x^2 + \sin^2 \phi / \alpha_y^2))}}{4\pi \alpha_x \alpha_y} \dots\dots\dots (5.5.5)$$

onde :

- ρ_d é a refletância difusa;
- ρ_s é a refletância especular;
- δ é o ângulo entre a superfície normal \hat{n} e o vetor bissetriz entre o ângulo incidente e o refletido, \hat{h} ;
- α_x é o desvio padrão da inclinação da superfície na direção x;
- α_y é o desvio padrão da inclinação da superfície na direção y.

e

$$\delta = \left[\frac{-\log(u_1)}{\cos^2 \phi / \alpha_x^2 + \sin^2 \phi / \alpha_y^2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (5.5.6)$$

e

$$\phi = \tan^{-1} \left[\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x} \right) \tan(2 \pi u_2) \right] \dots\dots\dots (5.5.7)$$

onde:

- ϕ é o ângulo azimutal relativo ao material não isotrópico;
- u_1 e u_2 são variáveis aleatórias uniformes no intervalo (0,1].

Esses modelos foram desenvolvidos como aproximação de dados de refletância medidos e são garantia de serem fisicamente válidos como parâmetros que são guardados dentro de faixas prescritas (WARD, 1992).

Limitações:

Alguns materiais não podem usar importância amostral por Monte Carlo porque não há um método geral para calcular posições amostrais para funções f_r (BRTDF) arbitrárias. A componente especular será amostrada se o material é um dos tipos padrões do programa Radiance (*plastic*, *metal*, *trans*, *plastic2*, *metal2* ou *trans2*). As componentes especulares que pertencem a um tipo de função f_r (BRTDF) arbitrária somente são consideradas durante os cálculos difusos direto e indireto. Isto é, a função f_r (BRTDF) será calculada nas direções da fonte de luz e então acrescentada à porção difusa indireta.

A separação da reflexão nas componentes difusa e especular, cada uma com um multiplicador constante, é uma aproximação determinante.

Alguns materiais não se ajustam muito bem neste modelo, porque tornam-se relativamente mais especulares em ângulos de incidência muito grandes. É impossível modelar esse efeito no Radiance, sem comprometer o balanço energético do cálculo da difusão indireta, uma vez que uma superfície sem uma constante multiplicadora difusa não possui uma componente lambertiana.

5.5.15 Armazenamento (*caching*) da Irradiância Indireta

Embora os efeitos das interreflexões difusas sejam sutis, tornam-se importantes para a acurácia do cálculo e influenciam na aparência das cenas com pouca ou nenhuma iluminação direta.

Por interreflexão difusa, subentende-se as superfícies que não são designadas como fontes de luz e dão contribuições não lambertianas. Na avaliação padrão por Monte Carlo ou caminho traçado (*path-tracing*) da equação da radiância, seria necessário amostrar direções de raios aleatórios sobre todo o hemisfério (ou esfera para transmissão difusa) para cada *pixel*. Isto torna-se proibitivo, visto que, seriam necessários em torno de 100 a 1000 raios para amostrar adequadamente o hemisfério em um dado ponto (caso múltiplas interreflexões fossem consideradas, mais raios seriam necessários).

O procedimento tomado pelo programa Radiance é o seguinte: tomar amostras em pontos selecionados e interpolar valores entre esses pontos. Como a componente difusa indireta tende a mudar muito lentamente na superfície, este procedimento funciona bem, assim não é necessário recalcular a componente difusa para todos os pontos.

5.5.16 Cálculo da Irradiância Indireta

A irradiância indireta é a integral da radiância que não emana diretamente das fontes de luz sobre o hemisfério projetado (projetado quer dizer cosseno ponderado) e é definido como:

$$E_{ind} = \int \int L_{ind}(\theta_i, \phi_i) * \cos \theta_i * \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \dots\dots\dots (5.5.8)$$

A técnica de aproximação aplicada para a equação acima usa a avaliação por Monte Carlo. As direções do raio usadas como amostras são determinadas pela técnica de inversão padrão de Monte Carlo (RUBENSTEIN, 1981) :

$$E = \left[\frac{\pi}{M.N} \right] \left[\sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} L_{j,k} \right] \dots\dots\dots (5.5.9)$$

onde:

- $L_{j,k}$ é a radiância indireta na direção:

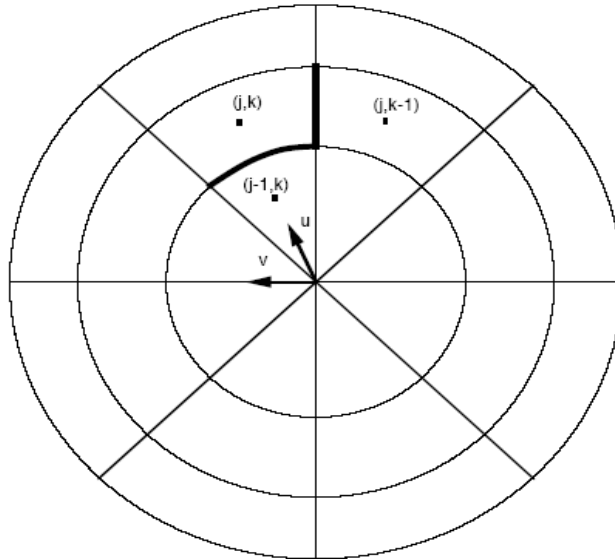
$$(\theta_j, \theta_k) = \left(\arcsin \sqrt{\frac{j+X_j}{M}}, 2\pi \frac{k+Y_k}{N} \right) ;$$
- X_j , Y_k são variáveis aleatórias distribuídas uniformemente na faixa $[0,1)$;
- $M.N$ é o número total de amostras e $N \approx \pi M$.

5.5.17 Cálculo do Gradiente da Irradiância

O hemisfério de amostragem diz quanta luz é refletida por outras superfícies visíveis em relação ao ponto. A soma dessas amostras é a irradiância indireta deste ponto. A informação do gradiente de irradiância está contido implicitamente no hemisfério de amostragem.

O gradiente da irradiância indica como o campo irradiância muda em função da posição e orientação. Ele é a primeira derivada de um campo escalar definido em um espaço multidimensional e geralmente é representado por um vetor. Uma vez que a irradiância é uma função de cinco variáveis, três para posição e duas para direção, o gradiente da irradiância deveria ser um vetor de cinco dimensões. Por conveniência computacional, são utilizados dois vetores tridimensionais separados, ao invés de cinco. Um corresponde à magnitude e direção esperada do gradiente rotacional e o outro corresponde à direção e magnitude do gradiente de translação. A figura 5.5.2 mostra uma visão superior do hemisfério de amostragem.

FIGURA 5.5.2 - REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DAS AMOSTRAS E DOS VETORES DIRECIONAIS USADOS PARA CALCULAR O GRADIENTE DA IRRADIÂNCIA



FONTE: WARD, G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with radiance**: the art and science of lighting visualization. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, p.542.1998.

5.5.18 O Gradiente de Rotação

O gradiente de rotação é a diferencial parcial da irradiância em relação à orientação. Para calcular o gradiente, efetua-se a soma da diferencial do cosseno para cada amostra de contribuição. A fórmula é dada por:

$$\vec{\nabla}_r E = \frac{\pi}{M.N} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \vec{v}_k \sum_{j=0}^{M-1} -\tan \theta_j * L_{j,k} \right\} \dots\dots\dots (5.5.10)$$

onde :

\vec{v}_k é o vetor unitário do plano base na direção $\phi_k + \frac{\pi}{2}$;

A tangente aparece na somatória porque a diferencial do cosseno é menos seno e a amostragem contém implicitamente a ponderação em cosseno,

sendo necessário multiplicar os valores das amostras pela tangente para ter novamente uma ponderação em seno.

5.5.19 O Gradiente de Translação

Como uma aproximação do gradiente supõe-se que cada amostra define um trecho independente para uma certa distância. Pode-se aproximar o gradiente associado de uma amostra do hemisfério associado, usando a diferença entre ela e as amostras vizinhas e distância mínima junto ao contorno. Pode-se calcular o gradiente para dois contornos (j,k) e repetir o procedimento para cada amostra para conseguir a soma total. A fórmula é dada por:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_t E = & \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \vec{u}_k \left(\frac{2\pi}{N} \right) \sum_{j=1}^{M-1} \left\{ \frac{\sin \theta_{j-} \cdot \cos^2 \theta_{j-}}{\text{Min}(r_{j,k}, r_{j-1,k})} \cdot (L_{j,k} - L_{j-1,k}) \right\} \right\} + \\ & + \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \vec{v}_{k-} \sum_{j=0}^{M-1} \left\{ \frac{\sin \theta_{j+} - \sin \theta_{j-}}{\text{Min}(r_{j,k}, r_{j,k-1})} \cdot (L_{j,k} - L_{j,k-1}) \right\} \right\} . \end{aligned} \quad (5.5.11)$$

onde:

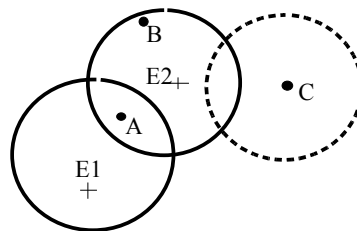
- \vec{u}_k é o vetor unitário na direção ϕ_k ;
- \vec{v}_{k-} é o vetor unitário na direção $\phi_{k-} + \frac{\pi}{2}$;
- θ_{j-} é o ângulo polar no contorno anterior, $\sin^{-1} \sqrt{\frac{j}{M}}$;
- θ_{j+} é o ângulo polar no contorno posterior, $\sin^{-1} \sqrt{\frac{j+1}{M}}$;
- θ_{k-} é o ângulo azimutal no contorno anterior, $2\pi \frac{k}{N}$;
- $r_{j,k}$ é a distância de intersecção para a célula (j,k) .

5.5.20 Interpolação para a Radiância

O algoritmo de interpolação de irradiância atende a duas finalidades essenciais. A primeira é interpolar entre valores de irradiância armazenados. O segundo é determinar quando não há valores suficientes dentro do *cache* para permitir interpolação, deste modo provocando uma nova amostragem para esse ponto. No programa Radiance é necessário haver um único valor no *cache* para se proceder a interpolação.

O exemplo simplificado da figura 5.5.2a, mostra dois valores de irradiância indireta calculados, E1 e E2 e três pontos amostrais, A, B, C. O ponto A está dentro da faixa válida de E1 e E2 que serão usados para a interpolação para o ponto A. O ponto B está dentro da faixa de E2 somente e será utilizada uma extrapolação para este ponto. O ponto C está fora das faixas de E1 e E2 e será necessário calcular um novo valor de irradiância para este ponto.

FIGURA 5.5.2a - REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DAS IRRADIÂNCIA INDIRETAS E1, E2 CALCULADAS.



FONTE: WARD, G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with radiance**: the art and science of lighting visualization. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, p.544.1998.

As duas finalidades, interpolação e avaliação de proximidade, pela estratégia de ponderação média, servem muito bem à estes fins. As ponderações nestes casos, para uma nova posição, são inversamente proporcionais ao erro previsto ao utilizar um valor particular no *cache*. No exemplo acima, interpolando para um ponto A, será usado um peso para E1, que é inversamente proporcional ao erro esperado do valor E1 para o ponto A. Da mesma forma, o peso para E2 será inversamente proporcional ao erro esperado para A. Se uma ponderação

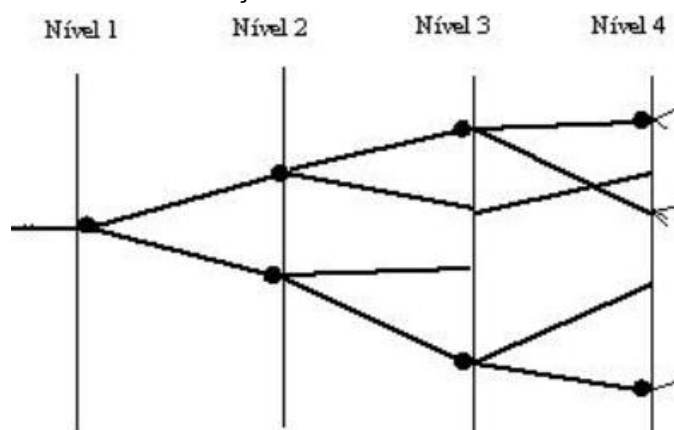
corresponder a um erro maior do que a tolerância especificada pelo usuário, o valor no *cache* não será usado. Isto define o domínio de validade do valor da irradiância no *cache*, que é visto como um círculo ao redor de cada valor no diagrama.

5.5.21 Múltiplas Reflexões Difusas

As interreflexões difusas no Radiance estão limitadas a um valor máximo, uma vez que as interreflexões possuem um alto custo dentro do cálculo e em muitos casos, depois de uma ou duas reflexões, não há um grande efeito na distribuição da iluminação. Enquanto o armazenamento em *cache* da irradiância indireta resulta em grande economia para o cálculo de uma única reflexão, há uma extraordinária economia para os cálculos de múltiplas reflexões.

A figura 5.5.3 a seguir, mostra de maneira simplificada o que acontece quando o Radiance calcula múltiplas interreflexões. Os níveis mais altos na árvore são finalizados, gerando novos cálculos indiretos somente quando não há valores próximos no *cache*. Na figura, as linhas representam raios e os pontos representam avaliações indiretas.

FIGURA 5.5.3 – REPRESENTAÇÃO DE MÚLTIPLAS INTERREFLEXÕES.



FONTE: WARD, G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with radiance**: the art and science of lighting visualization. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, p.544.1998.

5.5.22 Aproximação por uma Constante Ambiente

Na maioria das vezes, a luz refletida é mais ou menos uniforme depois de uma ou duas reflexões. Este é o motivo pelo qual, no Radiance, aplica-se uma constante de aproximação para a interreflexão, depois de um número de reflexões tenha sido calculado. Este valor ambiente, dado em unidades de watts/sr/m^2 , corresponde à radiância média medida em todas as direções na cena visível, exceto as fontes de luz, e este valor é usado no lugar da média, através das amostras hemisféricas. O valor utilizado como aproximação ambiente no cálculo pode não ser constante, mas uma variação da média geométrica calculada de valores ambientes especificados pelo usuário e a acumulação de todos os valores de irradiância indiretas calculadas.

5.5.23 Iluminação Difusa

Outro uso para cálculo de irradiância indireta é manipular fontes de luz muito grandes, especialmente fontes distantes, tais como as que existem no céu. Mesmo que saibamos que o céu seja uma fonte de iluminação significativa, e, não precise que cálculos de interreflexões sejam feitos para determinar seu brilho, é difícil tratá-lo de maneira apropriada, como parte da componente direta.

Outro exemplo de substituição de fontes de luz nos cálculos indiretos é quando existem fontes de luz muito grandes e uniformes, como em tetos que possuam sistema de iluminação.

5.5.24 Relação de Parâmetros para Renderização

O programa Radiance possui alguns parâmetros de renderização para serem utilizados conforme o grau de necessidade ou acurácia solicitada. A seguir são citados alguns destes parâmetros:

- a) -av: é a aproximação constante de valor ambiente para uma dada radiância na escala RGB. Corresponde à radiância média em todas as direções na cena visível, em watts/sr/m^2 . Se forem considerados

valores de irradiância no *cache*, o valor da constante será ponderado por uma média móvel destes valores;

- b) -aw: é a ponderação ambiente para um dado valor ambiente de um inteiro especificado. Um valor nulo determina que não será usado o cálculo da média móvel, mas um valor inicial;
- c) -ab: é o número de saltos (reflexões) ambiente para um inteiro especificado. As muitas interreflexões difusas serão calculadas antes que o valor constante ambiente substitua a amostragem hemisférica e ou interpolação;
- d) -ad: é o número de divisões ambiente, informa como as muitas amostras iniciais serão emitidas a partir do hemisfério dividido. Aumentando este valor, melhora a acurácia das irradiâncias calculadas. Ele é necessário em cenas com grande variação de brilho;
- e) -as: é o número de super amostras ambientes. Esse é o número de raios extras que serão usados para amostrar áreas em hemisfério que parecem ter alta variância. A super amostragem melhora significativamente a acurácia em cenas com grande brilho, e em regiões escuras;
- f) -aa: é a acurácia ambiente para uma fração especificada. É o valor de erro máximo permitido na interpolação de irradiância indireta e geralmente é menor que 0,3;
- g) -ar: é a resolução ambiente para dado inteiro;
- h) -af: armazena valores no cache em um arquivo denominado ambiente.
- i) -ae: adiciona os materiais utilizados em uma lista de ambientes eliminados. Superfícies modificadas por esses materiais são excluídos do *cache* da irradiância indireta e recebem uma aproximação do valor constante ambiente.

5.5.25 Fontes de Luz Secundária

O que acontece quando o programa Radiance não conhece o comportamento das fontes concentradas de luz, com o passar do tempo? Um exemplo seria o de uma janela com cortinas translúcidas.

Quando se considera, para simplificação, uma troca da janela (objeto real), por uma fonte de luz primária, encontramos dois problemas: o primeiro seria tratar a componente da alta irradiação direcional e brilhante do sol através da janela; o segundo não seria possível observar através da janela, pois seria vista uma fonte de luz e não um painel de vidro.

Para ambos os problemas o programa possui uma solução ao empregar um material denominado *illum*. Ao empregar este material, a janela é tratada como uma fonte de luz, quando existe a necessidade de obter sua contribuição no cálculo da iluminação para um determinado ponto. Não existindo esta necessidade, o programa a trata como se fosse um painel de vidro e considera quaisquer contribuições externas de outras fontes de luz, tais como o sol.

5.5.25.1 O material denominado *illum*

Essencialmente similar ao tipo *light*, *illum* possui parâmetros para a radiância da superfície em consideração, mas com um nome alternativo direcionando o comportamento dos raios incidentes indiretos para essa fonte particular considerada. Pode-se pensar como um mecanismo de captura da luz média do objeto.

É mais apropriado usar o tipo *illum* para uma fonte quando as duas condições abaixo são encontradas:

1. quando um objeto contribui significativamente para a iluminação de uma cena, o suficiente para causar sombras visíveis;
2. olhando-se para o objeto diretamente, importantes detalhes são revelados (tais como ver através de uma janela).

Alguns tipos comuns de objetos em que o tipo *illum* deve ser utilizado: luminárias decorativas, janelas limpas e complexas.

As luminárias decorativas preenchem as duas condições acima citadas. A primeira é que essas luminária reúnem condições de emitir sombras em objetos e a segunda é que elas são “decorativas” e os seus detalhes visuais são importantes.

6 MÉTODO E PROCEDIMENTOS

Neste capítulo é descrito o método de pesquisa, através do detalhamento dos procedimentos utilizados para atingir os objetivos propostos. O método utilizado é um estudo de caso de uma luminária estilo republicano utilizada como equipamento de iluminação pública em vários locais da cidade de Curitiba, Estado do Paraná bem como em várias regiões do Brasil.

Os dados coletados são o levantamento fotográfico, a bibliografia relativa a este equipamento de iluminação pública e a análise em laboratório, do equipamento objeto do estudo (conjunto formado pelo bulbo de polietileno, lâmpada e reator montado em base metálica) instalada no laboratório de conforto ambiental do curso de Arquitetura da Universidade Federal do Paraná.

Segue a descrição da análise das informações, composta dos resultados obtidos pela representação gráfica bidimensional dos resultados.

Finaliza-se com a simulação numérica computacional, comparando-se os resultados encontrados, bem como verificando-se as discrepâncias ou desvios encontrados nos resultados, para determinar a eficiência do equipamento de iluminação, juntamente com uma proposta empregada dentro do campus da UFPR.

6.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto deste estudo, apresentado na figura 6.1, localiza-se no Laboratório de Conforto Ambiental do curso de Arquitetura da Universidade Federal do Paraná, bem como em algumas praças e logradouros públicos da cidade de Curitiba, Estado do Paraná.

FIGURA 6.1-LUMINÁRIA LOCALIZADA EM PRAÇA PÚBLICA



FONTE: O auto

O objeto em estudo é formado por um poste metálico de altura variável (extensível até 1,60 m), uma base metálica de sustentação do conjunto globo, reator, soquete em porcelana e lâmpada. O globo ou bulbo é de polietileno de alta densidade, produzido pelo processo de rotomoldagem, com altura de 602 mm. O reator utilizado não foi considerado na experimentação. A lâmpada utilizada é do tipo vapor de sódio de alta pressão (VST), marca Empalux, com 250 W de potência, com fluxo luminoso de 28000 lúmens, conforme dados fornecidos pelo fabricante da lâmpada.

O Laboratório de Conforto Ambiental disponibilizou uma sala escura com 3,70m x 1,75m x 3,30m, com as paredes pintadas na cor preta. No chão foi utilizada uma cobertura em tecido na cor preta. Os equipamentos para análise da Iluminância (luxímetros) são da marca Minipa MLM-1332 e um computador Pentium 4 com 512 Mbyte de memória, para a simulação numérica.

O LACTEC disponibilizou a análise luminotécnica da luminária e da lâmpada (figura 6.2). Esta análise foi elaborada em uma esfera integradora e os resultados são apresentados no item a seguir.

FIGURA 6.2 - ANÁLISE FOTOMÉTRICA EM ESFERA INTEGRADORA NO LACTEC/COPEL



FONTE: O autor

6.2 COLETA DE DADOS

Para a coleta dados foi procedido o levantamento fotográfico do equipamento objeto do trabalho, na cidade de Curitiba - Estado do Paraná, verificando-se as condições de uso do equipamento público.

A seguir, buscou-se informações em material bibliográfico que estivesse relacionado ao objeto em estudo.

Procedeu-se então, o estudo em laboratório para se obter os parâmetros iniciais de análise e comparação.

6.2.1 Levantamento Fotográfico e Bibliográfico

Foi realizado um levantamento fotográfico em algumas praças e logradouros públicos e baseado neste levantamento, fez-se a leitura da área no entorno do equipamento de iluminação, verificando sua disposição em relação às

edificações, praças e logradouros públicos e sua caracterização lumínica com a finalidade de iluminação eficiente.

6.2.2 Da análise em Laboratório

A análise feita no LACTEC do conjunto formado pela base de sustentação e lâmpada e depois pela base de sustentação, luminária e lâmpada, na esfera integradora, forneceu os parâmetros iniciais do estudo e comparação do equipamento de iluminação pública.

O resultado encontrado foi:

- a) fluxo luminoso da lâmpada com o reator que acompanha a luminária:
 $\varphi_1 = 26.400$ lúmens;
- b) fluxo luminoso da luminária com a lâmpada e reator: $\varphi_2 = 19.640$ lúmens;
- c) fator de correção $F_c = E_{hh} / E_{hx} = 1,1187$ (dato fornecido pelo LACTEC);
- d) rendimento: $\varphi_2 / \varphi_1 \times F_c \times 100 = 83,2 \%$

Os mais importantes parâmetros de iluminação de uma determinada luminária podem ser enumerados da seguinte forma:

1. distribuição de intensidade luminosa – $I_{c,\gamma}$ [cd];
2. fluxo luminoso: φ [lm];
3. eficiência luminosa: η [-];
4. distribuição da luminância na superfície da luminária – L [cd²]

O levantamento de dados na análise da experimentação com o equipamento, na sala escura do laboratório de conforto ambiental, foi feito primeiramente com o conjunto poste, base de sustentação, reator, soquete de porcelana e lâmpada e, na seqüência, considerando o acréscimo do globo de polietileno.

Para o cálculo da curva de intensidade luminosa emprega-se a expressão:

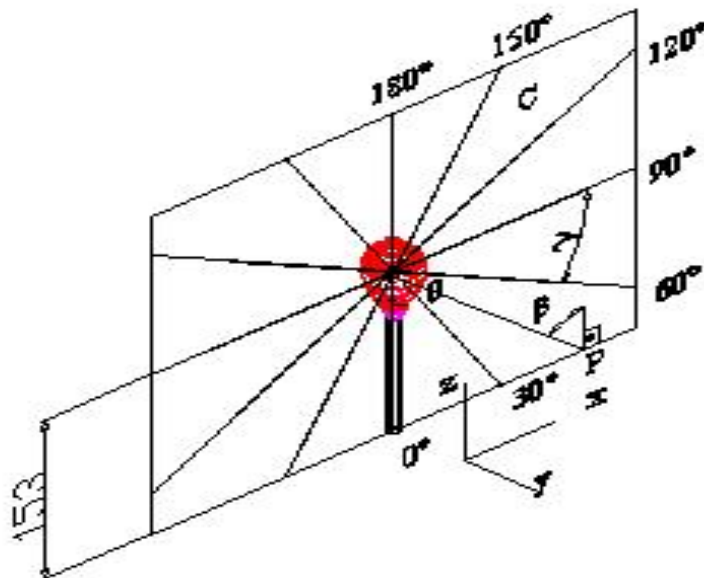
$$I_{C,\gamma} = E_p \cdot \frac{D^2}{\cos \beta} \dots\dots\dots(6.1)$$

onde:

- β é o ângulo entre a normal no ponto P e a direção da fonte (figura 6.3);
- D [m] é a distância do ponto P à fonte;
- $I_{C,\gamma}$ [cd] é a intensidade luminosa no plano C no ângulo γ ;
- E_p [lux] é a iluminância no ponto P.

Considerando-se o ponto de referência inicial a 1,53 m do piso, conforme indicado na figura 6.3, os resultados obtidos foram tabelados e encontram-se no apêndice A.

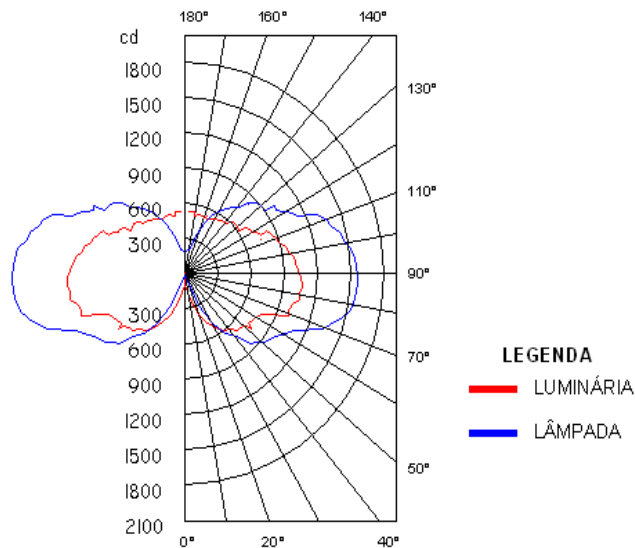
FIGURA 6.3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO OBJETO EM ESTUDO



FONTE: O autor

A curva de intensidade luminosa do objeto em estudo, na forma polar, em laboratório, é mostrada na figura 6.4 :

FIGURA 6.4 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CURVA DE INTENSIDADE LUMINOSA EM LABORATÓRIO



FONTE: O autor

6.2.3 Da Simulação Numérica

Para a finalidade da simulação numérica há a necessidade da descrição das formas dos elementos que compõem o sistema ótico da luminária. Particularmente necessário é descrever as formas dos seguintes elementos:

1. refletor;
2. globo;
3. fonte de luz sólida (filamento, tubo, bulbo);
4. base, soquetes, braços de sustentação e todos os outros elementos acessórios da luminária.

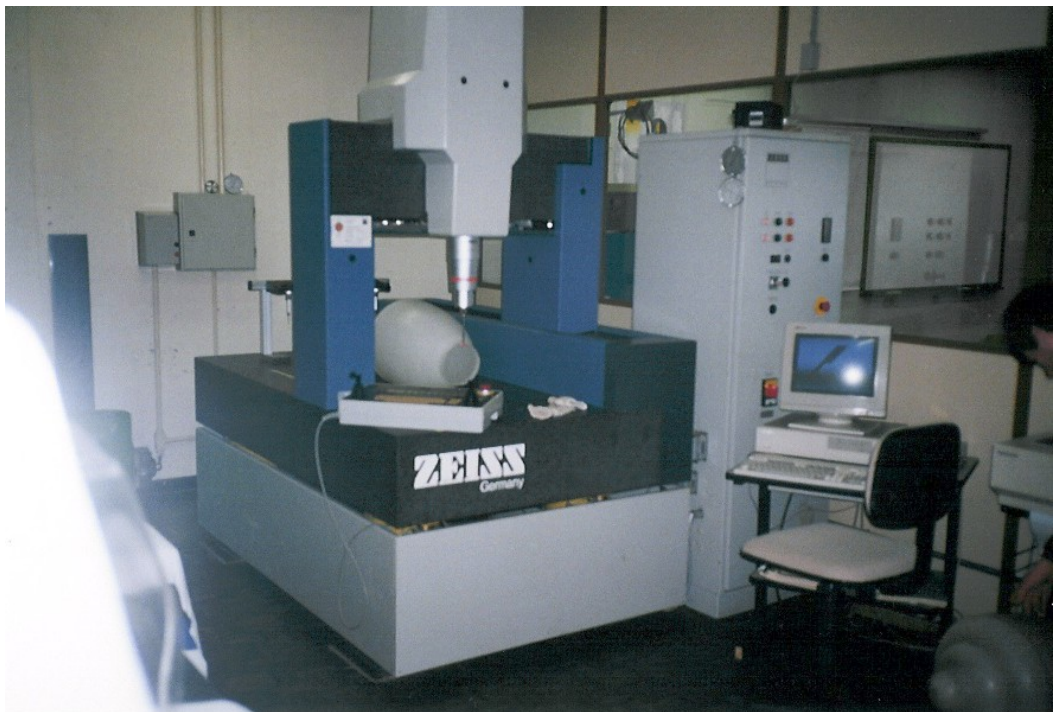
A descrição da geometria da luminária foi dividida da seguinte maneira.

- 1 Do globo de polietileno de alta densidade.
 - 1.1 Consulta ao fabricante da luminária para conseguir o projeto que deu origem ao globo de polietileno. Não foi possível obter o

projeto devido à sua inexistência, conforme informações do fabricante;

- 1.2 O levantamento do perfil do globo foi elaborado utilizando-se o equipamento ZEISS UMM 850, que forneceu todas as coordenadas necessárias para elaborar seu perfil, indicado na figura 6.5.

FIGURA 6.5 -LEVANTAMENTO DO PERFIL DO GLOBO

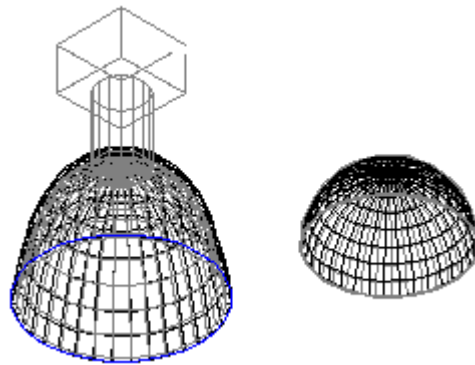


FONTE:O autor

- 1.3 Uma vez obtidas as coordenadas numéricas deste perfil, foi utilizado o Desktop Radiance integrado ao AutoCAD para interpretar e produzir a geometria tridimensional do globo. Entre os muitos modelos tridimensionais possíveis, somente os modelos de superfície e os modelos sólidos são aplicados. Isto significa que com os modelos de superfície (polígonos) é possível criar elementos complexos em termos de forma,

geralmente formas curvas, sendo formados por processos de subdivisão em pequenos elementos de superfície (figura 6.6).

FIGURA 6.6 - MODELOS CAD DE GLOBO E REFLETOR COM SUPERFÍCIES DIVIDIDAS EM ELEMENTOS DISCRETOS



FONTE:O autor

Superfícies reais de globos ou refletores parabólicos com formas complexas são substituídas por superfícies formadas por um conjunto de elementos discretos. Os outros elementos formadores do conjunto da luminária, soquete, lâmpada, base de sustentação, etc, são assim determinados.

O programa Radiance, na versão utilizada, aceita na descrição dos globos e refletores e demais elementos os seguintes materiais: *metal*, *plastic*, *trans* e *mirror* (somente a definição interna do programa). Os materiais *plastic* e *metal* aceitam definições criadas pelo próprio usuário, conforme as propriedades físicas (transmitância, índice de refração, etc) dos materiais previamente determinados.

Para o globo de polietileno foi utilizado o seguinte conjunto de parâmetros na simulação (LARSON,1991):

material: *trans*;

R G B: todas iguais a 0,784706 (preto - branco [0:1]);

especularidade: 0,07 (fosco – acetinado [0:1]);

rugosidade: 0,02 (polido – baixo brilho [0:1]);

transmissividade: 0,806333 (opaco-transparente [0:1]);

especularidade transmitida: 0,01 (difuso – claro [0:1]).

A transmissividade é dada pela expressão:

$$t_n = \frac{\sqrt{0,8402528435 + 0,0072522239 * T_n^2} - 0,9166530661}{0,0036261119 * T_n} \dots\dots\dots(6.4)$$

onde T_n é a transmitância do material; é igual a 0,74.

2 Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão:

A descrição das propriedades da luz das lâmpadas (fontes de luz) podem ser feitas de duas maneiras diferentes. Na primeira, é possível construir a forma real da fonte de luz sólida (filamento, tubo em arco, bulbo) e na segunda é substituir a forma real com a construção de pequenas esferas possuindo a distribuição da intensidade luminosa real das fontes. Este método é usado para lâmpadas com bulbo claro. Na tabela 6.1 tem-se a correlação entre as formas das fontes de luz e o modelamento.

TABELA 6.1 - FORMAS DAS FONTES DE LUZ SÓLIDA E O MODELAMENTO

Lâmpada	Incandescente	Fluorescente	Vapor de Mercúrio c/ bulbo claro	Vapor metálico	Vapor de sódio de alta pressão
Fonte de luz sólida	Filamento	Bulbo	Tubo em arco	Tubo em arco	Tubo em arco
Modelamento da forma da fonte de luz sólida	Cilindro com pequeno raio (cilindro fino)	Cilindro	Cilindro	Esfera, Cilindro	Cilindro

A forma real da fonte de luz sólida pode ser construída de pequenos elementos de superfície usando geometria em forma de polígonos. É também possível usar modelos sólidos (cilindro, esfera, mas nesse caso as dimensões da fonte de luz não são consideradas). Todos os raios de luz são traçados na direção

do centro da fonte de luz. Essa consideração é aceita para luminárias difusoras mas não para refletores especulares.

O material especificado para a fonte de luz é *light*, que é o material básico para superfícies com iluminação própria e que emitem luz de forma difusa. A descrição do material *light* para a fonte de luz é:

modifier ***light*** identifier

0

0

3 R_R R_G R_B

onde R_R , R_G e R_B são valores de radiância para as cores primárias básicas *Red*, *Green and Blue* (abreviado como RGB), representadas pelos “canais” R G B. Para fontes brancas os valores R_R , R_G e R_B possuem os mesmo valor entre si. Para a lâmpada que compõem o conjunto em estudo, a cor é a amarela.

Cada raio “transporta” uma certa quantidade de radiância expressa em $\text{Wm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. A radiância é subdividida em três “canais” correspondentes às cores básicas vermelho (R), verde (G) e azul (B). A radiância total R é calculada como a soma ponderada das radiâncias R_R , R_G e R_B transportadas.

$$R = 0,265.R_R + 0,670.R_G + 0,065.R_B \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}]$$

A transformação de unidades de radiância (unidades radiométricas) em unidades de luminância (fotométricas) é dado por:

$$L = 179.R = 47,1.R_R + 117,2 .R_G + 14,7. R_B \quad [\text{cd.m}^{-2}]$$

A determinação dos parâmetros R_R , R_G e R_B são calculados com o sub-programa *lampcolor*, dentro do programa Radiance, especificando as seguintes variáveis do objeto em estudo:

- tipo da lâmpada: HPS (lâmpada de vapor de sódio de alta pressão);
- unidade de comprimento: metro;
- geometria da lâmpada: cilindro;
- comprimento do cilindro: 0,205

- e) área do polígono: Área do cilindro em estudo;
 f) número total de lúmens da lâmpada: 26.400 lm

Para a lâmpada vapor de sódio de alta pressão, bifásico, da marca Empalux, com 250 Watts de potência, com a especificação de fluxo luminoso em 28.000 lumens, comprimento do bulbo cilíndrico em 245 mm, diâmetro nominal em 46 mm, da luminária em estudo, o resultado obtido foi:

$$R_R = 2.793,20; R_G = 1.020,88 \text{ e } R_B = 26,04$$

Não foi adotado o fluxo luminoso especificado pelo fabricante, pois o resultado final apresenta grande divergência com o medido em laboratório (LACTEC) e também na simulação numérica. Foi também considerada uma altura efetiva da lâmpada cilíndrica menor, pois foi descontada a base de rosqueamento da lâmpada.

A especificação dos materiais dos outros elementos que compõem a luminária e do entorno é apresentada na tabela 6.2:

TABELA 6.2 - ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS E OUTROS ELEMENTOS EMPREGADOS NA SIMULAÇÃO

Superfícies	Cor	material	R _e (%)	T _R (%)	E _s (%)	R _u (%)
paredes	preto	plastic	1,88	0	0	0
Chão/teto	preto	plastic	1,88	0	0	0
Poste de sustentação da luminária	preto	plastic	1,88	0	0	0
Base/fuste de apoio da luminária	verde	plastic	16,54	0	0	0
Base interna da luminária	verde	plastic	53,66	0	0	0
Soquete	Suporte-branco	plastic	80,00	0	0	0
Lâmpada vapor de sódio de alta pressão	branco	light	0	0	0	0

Onde:

- Refletância: R_e ;
- Transmitância: T_r ;
- Especificidade: E_s
- Rugosidade: R_u .

Para o cálculo da curva de intensidade luminosa da simulação numérica, emprega-se a equação 6.1, repetida abaixo:

$$I_{c,\gamma} = E_p \cdot \frac{D^2}{\cos \beta}$$

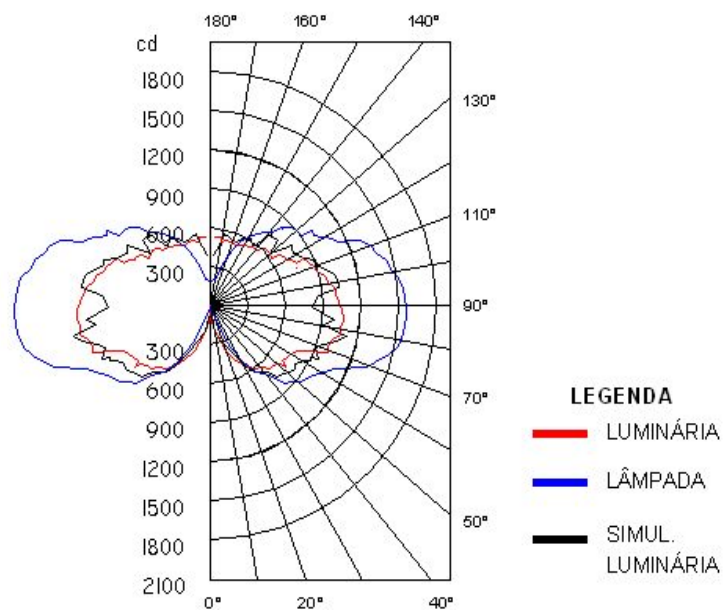
Foram utilizados os seguintes parâmetros do programa:

quality	penumbras	indirect	detail	variability
M	F	4	H	M

Os resultados obtidos foram tabelados e encontram-se no apêndice B.

A curva de intensidade luminosa do objeto em estudo, simulado e o medido em laboratório, na forma polar, representada na figura 6.7 :

FIGURA 6.7 - CURVA DE INTENSIDADE LUMINOSA DO EQUIPAMENTO SIMULADO E DO MEDIDO EM LABORATÓRIO



FONTE: O autor.

Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

Tempo da simulação para calcular a iluminação nos pontos previamente marcados: aproximadamente 5 minutos.

Tempo da simulação para a renderização da imagem final: aproximadamente 1 hora

Equipamento utilizado: Computador Pentium 4, com processador 3,2 GHz, 512 Mbytes de ram, placa de vídeo 256 Mbytes.

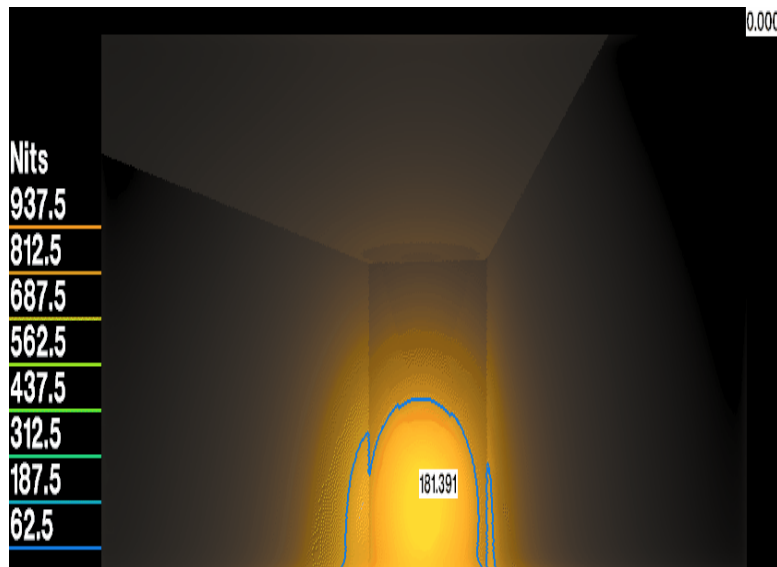
Utilizado o Desktop Radiance versão 2.0 com o AutoCAD 2000.

Os parâmetros utilizados no programa para a simulação foram os seguintes:

- exposure: 1;
- up : z;
- resolution: 512 512;
- quality: m;
- penumbras f;
- indirect: 4;
- detail: h;
- variability: m;
- oconv : -f;
- mkillum: -ab 1;
- render: -st .001 -dj .02 -av 0 0 0 -i;
- pfilt: -2.

A figura 6.8 mostra o resultado da renderização efetuada pelo software utilizando o conjunto completo (objeto de estudo) na sala escura.

FIGURA 6.8 - VISUALIZAÇÃO DA RENDERIZAÇÃO

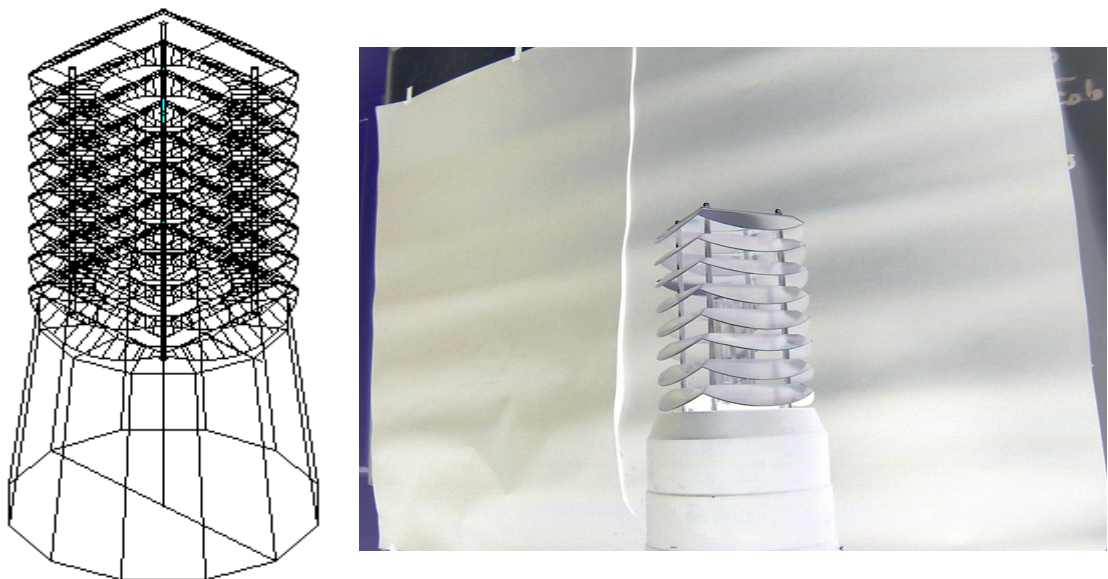


FONTE:O autor.

Um outro exemplo é a nova luminária apresentada na figura 6.9, utilizada no Campus da Universidade Federal do Paraná. São apresentados a luminária e o modelo elaborado para simulação.

Também é mostrada a simulação desta luminária com e sem o globo de polietileno.

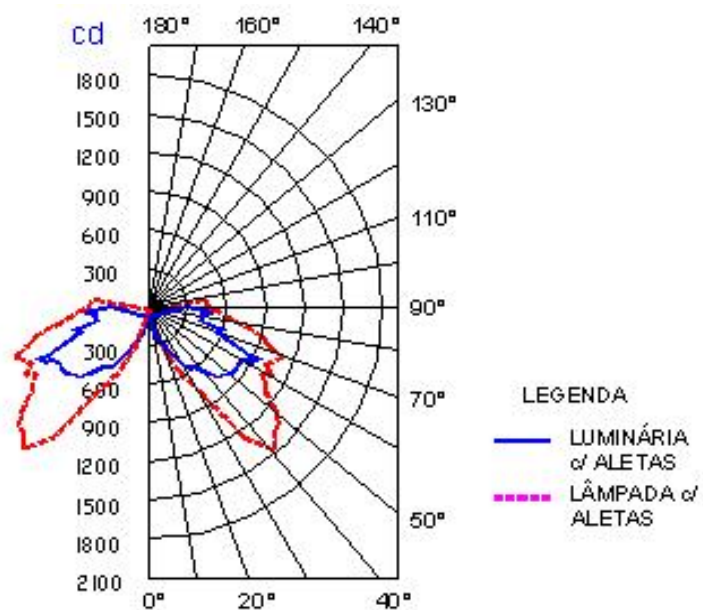
FIGURA 6.9- MODELAMENTO DA LUMINARIA E FOTOGRAFIA



FONTE:O autor

Os resultados encontram-se tabelados no apêndice C. A figura 6.10 mostra o resultado em forma polar, dos resultados obtidos, ao acrescentarmos este novo conjunto ao objeto em estudo.

FIGURA 6.10- REPRESENTAÇÃO POLAR DA INTENSIDADE LUMINOSA UTILIZANDO A NOVA LUMINÁRIA COM O GLOBO DE POLIETILENO



FONTE:O autor:

Observa-se que a nova luminária acrescentada ao objeto em estudo, permite que a intensidade luminosa, que antes era perdida para o espaço, seja agora aproveitada na superfície horizontal.

O resultado da simulação mostrado na figura 6.11 (a seguir), representa o efeito causado pelo acréscimo deste novo conjunto (luminária com as aletas difusoras), mostrando a diminuição das perdas para o espaço.

FIGURA 6.11-VISUALIZAÇÃO DA LUMINARIA RENDERIZADA COM O GLOBO DE POLIETILENO



FONTE:O autor

Na figura 6.12 está representada a luminária renderizada na sala escura com o conjunto da nova luminária (com aletas) e a lâmpada, não considerando o globo de polietileno (PAD).

FIGURA 6.12-VISUALIZAÇÃO DA LUMINARIA RENDERIZADA SEM O GLOBO DE POLIETILENO



FONTE:O autor:

7 CONCLUSÃO

Em vista da análise dos elementos estudados para este equipamento de iluminação pública, no que diz respeito à eficiência do globo de polietileno de alta densidade somado à lâmpada, reator, soquete e poste, além da e com a simulação deste equipamento, foram aferidos alguns resultados não satisfatórios.

A hipótese de que este sistema de iluminação não é eficiente pôde ser comprovada tanto pela via experimental como pela via numérica, por meio da simulação, empregando o método de *ray tracing* estocástico.

O globo de polietileno de alta densidade empregado não possui as características físicas (transmitância, cor, refração) adequadas, tornando todo o conjunto inadequado para o uso.

A simulação numérica apresenta algumas divergências em relação ao medido em laboratório, possivelmente necessitando uma melhor adequação do modelo físico às permitidas pela versão atual deste programa.

Uma alternativa para o uso desta luminária de polietileno seria o acréscimo de difusor ou de difusores como os encontrados no segundo exemplo de luminária apresentado, para que a parcela significativa da luz direcionada para o espaço possa ser aproveitada, diminuindo o número de luminárias e, ou, diminuindo a potência das lâmpadas.

O método de *ray tracing* estocástico apresentado e utilizado no programa Radiance demonstrou possuir alta qualidade em relação às imagens renderizadas. entretanto, esta versão do programa não permite o uso de materiais diversos dos pré-definidos, exceto os mencionados.

Existe, portanto, uma grande possibilidade de aprimoramento deste programa em futuras versões, facilitando a sua utilização de forma mais integrada à plataforma Windows e com o uso dos diversos sistemas CAD.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101**: iluminação pública. Rio de Janeiro, 1992.

BAUM, D. R.; RUSHMEIER, H. E.; WINGET, J. M. Improving radiosity solutions through the use of analytically determined form-factors. **Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)**, v. 23, p. 325–334, July, 1989.

BEKAERT, P.; NEUMANN, L.; NEUMANN, A.; SBERT, M.; WILLEMS, Y. D. **Hierarchical monte carlo radiosity**. Disponível em: <<http://www.cs.kuleuven.ac.be/cwis/research/graphics/CGRG.PUBLICATIONS/HMC/hmtc.html>>

COELHO, R.C. **Síntese, modelagem e simulação de estruturas neurais morfológicamente realistas**. São Carlos, 1998. (Tese de doutorado) – Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo

COHEN, M. F.; GREENBERG D. P. The hemi-cube: a radiosity solution for complex environments. **Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)**, v. 19, n. 3, p. 31– 40, July, 1985.

COHEN, M. F.; WALLACE, J. R. **Radiosity and realistic image synthesis**. Academic Press Professional, Boston, MA, 1993.

COMPAGNON, R. Radiance: a simulation tool for daylighting systems. Courses notes. The Martin Centre for Architectural and Urban Studies. University of Cambridge. UK, 1997.

COOK, R; PORTER, T; CARPENTER, L. Distributed ray tracing. **ACM SIGGRAPH**, v.18, n.3, p.137-145, July,1984.

COSTA, L. F.; OLIVEIRA, M. C. F.; MINGHIN, R. De olho nos neurônios: as “formas” virtuais do pensamento. **Ciência Hoje**, v. 28, n. 167, p. 44-51, dez. 2000.

CURTISS, J. H. A theoretical comparison of the efficiencies of two classical methods and a Monte Carlo method for computing one component of the solution of a set of linear algebraic equations. In **Symposium on Monte Carlo methods**, Florida, Mar.,16-17, 1954, p. 191– 233. J. Wiley and Sons, 1956.

DELVES, L. M.; MOHAMED, J. L. **Computational methods for integral equations**. Cambridge University Press, 1985.

DRISCOLL, W. **Handbook of optics**. Mc Graw-Hill, N.Y., 1978.

FERNANDES FILHO, G. E. F. Iluminação pública no Brasil: quem deve pagar a conta? **Eletricidade Moderna**, São Paulo, n. 310, p. 96-105, jan., 2000.

FLYNN, J. E.; SPENCER, J.; MARTYNYUK, O.; HENDRICK, C. Interim study of procedure for investigating the effect of light on impression and behaviour. **Journal of Illuminating Engineering Society**, 1973.

GARCEZ, N. **Conservação de energia na iluminação pública**. In Simpósio Brasileiro de Conservação de Energia em Iluminação, São Paulo, ago., 1989.

GELLER H.S. **Efficient electricity use**: a development strategy for Brazil. Washinton, D.C. Amercian Council for an Energy-Efficient Economy , 1991.

GORAL, C. M.; TORRANCE, K. E.; GREENBERG, D. P.; BATTAILE B. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In **SIGGRAPH '84 Conference Proceedings**. p. 213-222, Minneapolis, MN, July, 1984.

GORTLER, S.; SCHRÖDER, P.; COHEN, M.; HANRAHAN, P. Wavelet radiosity. In **SIGGRAPH '93 Proceedings**, p. 221–230, 1993.

GUYTON, A. C. **Tratado de fisiologia humana**. Rio de Janeiro. Interamericana, 1984.

HALTON ,J. H. Sequential Monte Carlo. **Proc. Cambridge Phil. Soc.**, v.58, p. 57 – 78, 1962.

_____. Sequential Monte Carlo techniques for the solution of linear systems. **Journal of Scientific Computing**, v.9, n. 2, p. 213 – 257, 1994.

HECKBERT, P. S.; WINGET, J. Finite element methods for global illumination. **Technical Report UCB/CSD 91/643**, Computer Science Division (EECS). University of California, Berkeley, California, USA, July, 1991.

_____. Simulating global illumination using adaptive meshing. **Technical Report UCB/CSD 91/636**, Computer Science Division (EECS). University of California, Berkeley, California, USA, June, 1991.

HUBEL, D. H. **Eye, brain and vision**. Scientific American Library. USA,1995.

KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. **The Monte Carlo method**. J. Wiley and Sons, 1986.

KAHN, H. Use of different Monte Carlo sampling techniques. In **Symposium on Monte Carlo methods**, Florida, Mar.,16-17, 1954, p. 146–190. J. Wiley and sons, 1956.

KRESS, R. **Linear integral equations**. Springer Verlag, 1989.

LARSON, C. **Radiance user's manual**: draft. Lighting Systems Research Group. Lawrence Berkeley Laboratory. Berkeley, California, 1991. 103 p.

LISCHINSKI, D.; TAMPIERI, F.; GREENBERG, D. P. Discontinuity meshing for accurate radiosity. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v.12, n. 6, p.25–39, nov., 1992.

LUNDY-EKMAN, L. **Neurociência e fundamentos para reabilitação**. Rio de Janeiro. Guanabara Koogan, 2000.

MARDALJEVIC, J. Validation of a Lighting Simulation Program under Real Sky Conditions. **Lighting Res. Technol.**, v.27, n. 4, p.181-88, 1995.

NIEDERREITER, H. Random number generation and quasi-Monte Carlo Methods, v. 63 of CBMS-NSF regional conference series in **Appl. Math. SIAM**, Philadelphia, 1992.

NISHITA, T.; NAKAMAE, E. Continuous tone representation of 3-D objects taking account of shadows and interreflection. **Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)**, v.19, n. 3, p. 23–30, July, 1985.

OWEN, A. B.; ZHOU, Y. Safe and effective importance sampling. **Technical report**. Stanford University, Department of Statistics, 1999.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in FORTRAN**. Cambridge University Press, 2. ed., 1992.

RUBENSTEIN, R.Y. **Simulation and the Monte Carlo method**. New York: Wiley and Sons. 1981.

SHIRLEY, P.; WANG C. e ZIMMERMAN K. Monte Carlo techniques for direct lighting calculations. **ACM Transactions on Graphics**, v.15, n. 1, p.1-36, 1996.

SILLION, F.; PUECH, C. **Radiosity and global illumination**. Morgan Kaufmann, San Francisco, 1994.

SPANIER, J. Geometrically convergent learning algorithms for global solutions of transport problems. In Lecture Comments in Computational Science and Engineering (**Proceedings of Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods**. Claremont, California, USA, June, 1998). Springer-Verlag, 1999.

TANAKA, J. S. Um modelo neuromórfico de estimativa de orientação e curvatura. São Carlos, 2000. (Tese de doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TELLER, T.; FOWLER, C.; FUNKHOUSER, T.; HANRAHAN, P. al. **Parttitioning and ordering large radiosity computations**. Disponível em: <<http://www.cs.Princeton.edu/~funk/sig94.pdf>>.

TROUTMAN, R.; MAX, N. L. Radiosity algorithms using higher order finite element methods. In **Computer Graphics Proceedings**, Annual Conference Series, 1993, p. 209–212, 1993.

VEITCH, J. A; NEWSHAM, G. R. Experts quantitative and qualitative assessments of lighting quality. **The 1996 Annual Conference of the Illuminating Engineering Society of North America**, Cleveland, OH, USA, 1996.

WARD, G. **Behavior of materials in RADIANCE**. Disponível em <<http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/materials.pdf> > Acesso em: 15 de março de 2005.

_____. Mesuring and modeling anisotropic reflection. **Computer Graphics**. Chicago, IL, July, 1992.

WARD, G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with radiance: the art and science of lighting visualization**. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1998. 664 p.

WATT, A. Rendering techniques: past, present and future. **ACM Computing Surveys**, v.28, n. 1, p. 157-159, 1996.

WHITTED , T. An improved illuminatinon model for shaded display of illuminated spaces. **Journal of the illuminating Engineering Society**, v. 17, n. 1, 1988.

_____. An improved illumination model for shaded display. **Communications of the ACM**, v. 23, n. 6, p. 343-349, 1980.

ZATZ, H. R. Galerkin radiosity: a higher order solution method for global illumination. In **Computer Graphics Proceedings**, Annual Conference Series, 1993, p. 213–220, 1993.

APÊNDICE A - TABELA DE RESULTADOS DO OBJETO MEDIDO EM LABORATÓRIO

1-considerando a lâmpada sem o globo

y=0, z=0

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	8	18	21	144	199	210	198	194	166	144	123	106	90	80	68	61	54
γ	4	12	19	25	31	36	41	45	48	51	54	57	59	61	62	64	65
$I_{C,\gamma}$ [cd]	19	45	58	455	740	936	1.068	1.272	1.324	1.393	1.437	1.487	1.507	1.509	1.592	1.673	1.724

y=0, x=0

z [cm]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
E [lux]	140	154	171	185	193	200	202	203	198	190	180	170	156	145	130	106
γ	69	72	75	78	81	84	88	89	85	82	79	76	73	70	67	64
$I_{C,\gamma}$ [cd]	2004	2083	2203	2288	2313	2345	2340	2348	2311	2283	2203	2161	2078	2039	1943	1695

y=0, z=330

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	8	96	146	176	189	186	174	158	146	132	114	97	91	77	69	61	55
γ	4	10	16	22	27	32	37	41	44	47	50	53	55	57	59	60	62
$I_{C,\gamma}$ [cd]	281	316	518	694	848	966	1058	1134	1240	1328	1357	1362	1501	1487	1552	1591	1655

2-Resultado considerando o globo de polietileno e a lâmpada:

y=0, z=0

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	65	140	200	217	215	200	175	155	128	111	91	78	66	57	49	43	38
γ	4	12	19	25	31	36	41	45	48	51	54	57	59	61	62	64	65
$I_{c,\gamma}$ [cd]	154	349	552	686	800	891	944	1.016	1.021	1.074	1.063	1.094	1.105	1.132	1.147	1.179	1.213

y=0, x=0

z [cm]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
E [lux]	105	110	118	129	132	137	137	135	130	126	117	111	100	94	75	77
γ	69	72	75	78	81	84	88	89	85	82	79	76	73	70	67	64
$I_{c,\gamma}$ [cd]	1503	1488	1520	1596	1582	1606	1587	1562	1517	1499	1432	1411	1332	1322	1121	1231

y=0, z=330

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	255	230	222	203	176	156	140	120	108	93	78	65	61	54	47	40	37
γ	4	10	16	22	27	32	37	41	44	47	50	53	55	57	59	60	62
$I_{c,\gamma}$ [cd]	804	756	787	800	789	810	851	861	917	936	928	913	1.006	1.043	1.057	1.043	1.113

APÊNDICE B - TABELA DE RESULTADOS DO OBJETO SIMULADO NO RADIANCE

Resultado considerando o globo de polietileno:

y=0, z=0

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	55	124	157	184	218	239	234	214	173	132	113	100	89	81	69	7	45
γ	4	12	19	25	31	36	41	45	48	51	54	57	59	61	62	64	65
I _{C,γ} [cd]	130	310	433	581	811	1.065	1.262	1.403	1.379	1.277	1.320	1.403	1.490	1.609	1.616	192	1.437

y=0, x=0

z [cm]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
E [lux]	94	105	123	135	115	127	97	105	111	131	127	120	125	97	92	78
γ	69	72	75	78	81	84	88	89	85	82	79	76	73	70	67	64
I _{C,γ} [cd]	897	947	1056	1113	919	993	749	810	864	1039	1036	1017	1110	909	917	831

y=0, z=330

Parâmetros para a simulação

quality	penumbras	indirect	detail	variability
M	F	9	H	H

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	189	230	233	203	193	175	139	155	129	109	78	79	73	72	52	32	48
γ	4	10	16	22	27	32	37	41	44	47	50	53	55	57	59	60	62
I _{C,γ} [cd]	397	504	551	533	577	606	564	741	730	731	619	739	803	927	780	556	963

APÊNDICE C - TABELA DE RESULTADOS DA LUMINÁRIA COM DIFUSOR

1-considerando a lâmpada sem o globo

y=0, z=0

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	15	164	179	265	319	423	408	314	255	192	143	114	91	82	68	55	45
γ	4	12	19	25	31	36	41	45	48	51	54	57	59	61	62	64	65
$I_{C,\gamma}$ [cd]	35	409	494	837	1.186	1.885	2.200	2.059	2.033	1.857	1.670	1.599	1.524	1.629	1.592	1.508	1.437

y=0, x=0

z [cm]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
E [lux]	116	109	107	116	131	140	134	131	119	103	-	-	-	-	-	-
γ	69	72	75	78	81	84	88	89	85	82	-	-	-	-	-	-
$I_{C,\gamma}$ [cd]	1660	1474	1378	1435	1570	1641	1552	1515	1389	1225	-	-	-	-	-	-

2-considerando a lâmpada com o globo

y=0, z=0

x [cm]	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332
E [lux]	55	124	157	184	218	239	234	214	173	132	113	100	89	81	68	55	45
γ	4	12	19	25	31	36	41	45	48	51	54	57	59	61	62	64	65
$I_{C,\gamma}$ [cd]	130	310	433	581	811	904	1.019	1.154	1.180	1.228	1.250	1.220	1.256	1.291	1.592	1.508	1.437

y=0, x=0

z [cm]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
E [lux]	56	58	61	64	64	65	64	61	58	54	-	-	-	-	-	-
γ	69	72	75	78	81	84	88	89	85	82	-	-	-	-	-	-
$I_{C,\gamma}$ [cd]	534	523	524	528	511	508	494	470	451	428	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE D - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS NO RADIANCE

DEFINIÇÕES

$R(\vec{P}, \hat{v})$	Valor de um raio começando em \vec{P} na direção \hat{v} (em watts/sr/m ²).
\vec{P}_0	Origem do ponto de vista.
\hat{v}	Direção do raio (direção) de vista.
\vec{P}_s	Ponto de intersecção do raio com a superfície.
\hat{n}	Superfície normal sem perturbação na intersecção.
a_n	Argumento real -n.
C	Cor do material, $\{a_1, a_2, a_3\}$.
p	Valor padrão do material; se não houver adota-se $\{1, 1, 1\}$.
\vec{d}	Vetor textura do material, [0,0,0].
\vec{b}	Vetor orientação dado por argumentos texto de tipos anisotrópicos.
n_1	Índice de refração.
n_2	Índice de refração.
A	Irradiância indireta (watts/m ²).
A_t	Irradiância indireta do lado oposto (watts/m ²).
\hat{m}	Direção do reflexo, que pode variar com amostragem por Monte Carlo.
t_s	Entrada especular (com a opção -st).
B_i	Radiância da amostra de fonte de luz i (watts/sr/m ²).
\hat{q}_i	Direção para amostra fonte i .
ω_i	Ângulo sólido da amostra fonte i (sr).

As variáveis com uma seta sobre elas são vetores. Variáveis com um circunflexo são vetores unitários, isto é, são normalizados. Todas as variáveis escritas em negrito representam valores de cor.

VARIÁVEIS DERIVADAS

\cos_1	cosseno do ângulo entre a superfície normal e o raio (direção) de vista.
\cos_2	Cosseno do ângulo entre a superfície normal e a direção de transmissão.
\hat{n}_p	Superfície normal alterada (após aplicação da textura).
\vec{h}_i	Vetor bisecção entre raio (direção) da vista e a amostra fonte i .
F_{TE}	Coefficiente de Fresnel para uma luz polarizada – TE.
F_{TM}	Coefficiente de Fresnel para uma luz polarizada – TM.
F	Coefficiente de Fresnel para uma luz não polarizada.

Esses valores são calculados como:

$$\cos_1 \equiv -\hat{v} \cdot \hat{n}_p$$

$$\cos_2 \equiv \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \cdot (1 - \cos_1^2)}$$

$$\hat{n}_p \equiv \frac{\hat{n} + \vec{d}}{\|\hat{n} + \vec{d}\|}$$

$$\vec{h}_i \equiv \hat{q}_i - \hat{v}$$

$$F_{TE} \equiv \left[\frac{n_1 \cos_1 - n_2 \cos_2}{n_1 \cos_1 + n_2 \cos_2} \right]^2$$

$$F_{TM} \equiv \left[\frac{n_1 / \cos_1 - n_2 / \cos_2}{n_1 / \cos_1 + n_2 / \cos_2} \right]^2$$

$$F \equiv \frac{1}{2} (F_{TE} + F_{TM})$$

MATEMÁTICA VETORIAL

As variáveis que representam valores vetoriais são escritas com uma seta acima (ex. \vec{v}). Vetores unitários (vetores cujos comprimentos são normalizados para 1) tem um circunflexo acima (ex. \hat{v}). Equações contendo vetores são repetidas para as três componentes. Assim, a equação:

$$\vec{v} = 2\hat{n} + \vec{P}$$

é equivalente a :

$$\vec{v}_x = 2\hat{n}_x + \vec{P}_x$$

$$\vec{v}_y = 2\hat{n}_y + \vec{P}_y$$

$$\vec{v}_z = 2\hat{n}_z + \vec{P}_z$$

Há também operadores para produto vetorial, produto escalar e para a norma do vetor.

Produto escalar : $\vec{a} \cdot \vec{b} \equiv a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$

Produto vetorial : $\vec{a} \times \vec{b} \equiv \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{bmatrix}$

Norma do vetor : $\|\vec{v}\| \equiv \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$

Os valores são agrupados dentro de um vetor da seguinte:

$$\vec{v} = [v_x, v_y, v_z]$$

MATEMÁTICA DA COR

As variáveis que representam valores de cor estão escritas em negrito e estes valores de cor podem ter qualquer número de amostras no espectro. O programa Radiance usa três valores de cor: vermelho, verde e azul (RGB) e quando uma variável de cor aparece em uma equação, esta é repetida para cada amostra do espectro. Assim a equação:

$$\mathbf{C} = \mathbf{AB} + d\mathbf{F}$$

significa o conjunto de equações:

$$C_1 = A_1 B_1 + dF_1$$

$$C_2 = A_2 B_2 + dF_2$$

$$C_2 = A_2 B_2 + dF_2$$

....

E assim por diante para qualquer número de amostras do espectro usadas.

A coleção de valores para uma cor, são representadas dentro de chaves, ex.:

$$\mathbf{C} = \{\mathbf{r}, \mathbf{g}, \mathbf{b}\}$$

FONTES DE LUZ

As fontes de luz possuem um comportamento simples quando observados diretamente; suas cores em uma direção particular são dadas pela equação:

$$\mathbf{R} = p\mathbf{C}$$

Os tipos de materiais para fontes de luzes especiais, *glow*, *spotlight* e *illum*, diferem somente nos seus efeitos no cálculo direto, isto é, quando os raios

são traçados para determinar sombras. Essas diferenças são explicados no manual de referência do Radiance.

TIPOS ESPECULARES

Os tipos de materiais especulares não envolvem teste de fontes de luzes especiais e são mais simples de descrever quando comparados à superfícies que possuam uma componente difusa. A radiância de saída é geralmente uma função da avaliação de um ou dois raios.

MIRRORS

O valor da radiância para uma superfície tipo *mirror* (espelho) é uma função do valor do raio na direção do espelho:

$$R = p C R(\vec{P}_s, \hat{m})$$

DIELECTRIC

O valor de um material *dielectric* (dielétrico) é calculado pelas equações de Fresnel:

$$R = p C_t (1 - F)(\vec{P}_s, \hat{t}) + C_t F R(\vec{P}_s, \hat{m})$$

onde:

$$C_t = C^{\|\vec{P}_s - \vec{P}_0\|}$$

$$\hat{t} = \frac{n_1}{n_2} \hat{v} + \left[\frac{n_1}{n_2} \cos_1 - \cos_2 \right] \hat{n}_p$$

A constante de Hartmann é utilizada para calcular o índice de refração de um material dielétrico.

GLASS

O tipo *glass* (vidro) utiliza como solução uma série infinita para as interreflexões que ocorrem dentro da estrutura interna de painéis de vidros finos.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = & \frac{1}{2} \mathbf{p} \mathbf{C}_t \mathbf{R}(\vec{P}_s, \hat{t}) \left[\frac{(1 - F_{TE})^2}{(1 - F_{TE}^2 \mathbf{C}_t^2)} + \frac{(1 - F_{TM})^2}{(1 - F_{TM}^2 \mathbf{C}_t^2)} \right] + \\ & + \frac{1}{2} \mathbf{R}(\vec{P}_s, \hat{m}) \left[\frac{F_{TE}(1 + (1 - 2F_{TE})\mathbf{C}_t^2)}{1 - F_{TE}^2 \mathbf{C}_t^2} + \frac{F_{TM}(1 + (1 - 2F_{TM})\mathbf{C}_t^2)}{1 - F_{TM}^2 \mathbf{C}_t^2} \right] \end{aligned}$$

onde:

$$\mathbf{C}_t = \mathbf{C}^{(1/\cos_2)}$$

$$\hat{t} = \hat{v} + 2(1 - n_2)\vec{d}$$

MODELO DE REFLEXÃO BÁSICA

O modelo de reflexão básica usado no Radiance, leva em consideração interações difusas e especulares nos dois lados da superfície. A maioria dos tipos de materiais utilizados no programa são casos especiais dessa fórmula geral:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = & \sum_{fontes} \mathbf{B}_i \omega_i \left\{ \text{Max}(0, \hat{q}_i \cdot \hat{n}_p) \left[\frac{\rho_d}{\pi} + \rho_{si} \right] + \text{Max}(0, -\hat{q}_i \cdot \hat{n}_p) \left[\frac{\tau_d}{\pi} + \tau_{si} \right] \right\} + \\ & + \rho_s \mathbf{R}(\vec{P}_s, \hat{m}) + \tau_s \mathbf{R}(\vec{P}_s, \hat{t}) + \left[\frac{\rho_a}{\pi} \mathbf{A} + \frac{\tau_a}{\pi} \mathbf{A}_t \right] \quad (1) \end{aligned}$$

Observa-se que somente uma das componentes transmitida ou refletida no primeiro termo da equação acima pode ser diferente de zero. Os valores de ρ e τ serão diferentes para cada tipo de material e são dadas a seguir para os tipos *metal*, *plastic* e *trans.PLASTIC*

Uma superfície *plastic* é incolor. Se a rugosidade da superfície (a_5) é nula ou a especularidade (r_s) é maior do que t_5 , então o raio segue a direção do espelho

ou uma direção próxima. Uma aproximação do coeficiente de Fresnel para reflexão ($r_s \approx 1 - F$) é usada para modificar a especularidade levando-se em conta o aumento da reflexão especular próxima dos ângulos de tangência.

A fórmula de reflexão é obtida acrescentando as seguintes definições dadas pela equação (1):

$$\rho_d = pC(1 - a_4)$$

$$\rho_{si} = \left\{ \begin{array}{ll} r_s \frac{f_s(\hat{q}_i)}{(\hat{q}_i \cdot \hat{n}_p) \cos_1} & \text{se } a_5 > 0 \\ 0 & \text{se diferente} \end{array} \right\}$$

$$\rho_s = \left\{ \begin{array}{ll} r_s & \text{se } a_5 = 0 \text{ ou } r_s > t_s \\ 0 & \text{se diferente} \end{array} \right\}$$

$$\rho_a = \left\{ \begin{array}{ll} pC(1 - r_s) & \text{se } a_5 = 0 \text{ ou } r_s > t_s \\ pC & \text{se diferente} \end{array} \right\}$$

$$\tau_a, \tau_d, \tau_{si}, \tau_s = 0$$

$$r_s = a_4$$

$$f_s(\hat{q}_i) = \frac{e^{[(\vec{h}_i \cdot \hat{n}_p)^2 - \|\vec{h}\|^2]/(\vec{h}_i \cdot \hat{n}_p)^2 / \alpha_i}}{4 \pi \alpha_i}$$

$$\alpha_i = a_5^2 + \frac{\omega_i}{4 \pi}$$

METAL

O tipo *metal* é idêntico ao tipo *plastic*, exceto na definição de r_s , que agora inclui a cor do material:

$$r_s = \{a_1 a_4, a_2 a_4, a_3 a_4\}$$

TRANS

O tipo *trans* acrescenta as componentes transmitidas e coloridas às componentes difusas e especulares do tipo *plastic*.

$$\rho_d = \mathbf{pC}(1 - a_4)(1 - a_6)$$

$$\rho_{si} = \begin{cases} \mathbf{r}_s \frac{f_s(\hat{q}_i)}{(\hat{q}_i \cdot \hat{n}_p) \cos_1} & \text{se } a_5 > 0 \\ 0 & \text{se diferente} \end{cases}$$

$$\rho_s = \begin{cases} \mathbf{r}_s & \text{se } a_5 = 0 \text{ ou } \mathbf{r}_s > t_s \\ 0 & \text{se diferente} \end{cases}$$

$$\rho_a = \begin{cases} \mathbf{pC}(1 - \mathbf{r}_s)(1 - a_6) & \text{se } a_5 = 0 \text{ ou } \mathbf{r}_s > t_s \\ \mathbf{pC}(1 - a_6) & \text{se diferente} \end{cases}$$

$$\tau_d = a_6 \mathbf{pC}(1 - \mathbf{r}_s) \cdot (1 - a_7)$$

$$\tau_{si} = \begin{cases} a_6 a_7 (1 - \mathbf{r}_s) \mathbf{pC} \frac{g_s(\hat{q}_i)}{(-\hat{q}_i \cdot \hat{n}_p) \cos_1} & \text{se } a_5 > 0 \\ 0 & \text{se diferente} \end{cases}$$

$$\tau_s = \begin{cases} a_6 a_7 (1 - \mathbf{r}_s) \mathbf{pC} & \text{se } a_5 > 0 \text{ ou } a_6 a_7 (1 - \mathbf{r}_s) > t_s \\ 0 & \text{se diferente} \end{cases}$$

$$\tau_a = \begin{cases} a_6 (1 - a_7) \cdot (1 - \mathbf{r}_s) \mathbf{pC} & \text{se } a_5 > 0 \text{ ou } a_6 a_7 (1 - \mathbf{r}_s) > t_s \\ a_6 (1 - \mathbf{r}_s) \mathbf{pC} & \text{se diferente} \end{cases}$$

$$\mathbf{r}_s = a_4$$

$$f_s(\hat{q}_i) = \frac{e^{[(\vec{h}_i \cdot \hat{n}_p)^2 - \|\vec{h}\|^2]/(\vec{h}_i \cdot \hat{n}_p)^2 / \alpha_i}}{4 \pi \alpha_i}$$

$$\alpha_i = a_5^2 + \frac{\omega_i}{4 \pi} \quad g_s(\hat{q}_i) = \frac{e^{(2 \hat{q}_i \cdot \hat{t} - 2)/\beta_i}}{\pi \beta_i} \quad \hat{t} = \frac{\hat{v} - \vec{d}}{\|\hat{v} - \vec{d}\|} \quad \beta_i = a_5^2 + \frac{\omega_i}{\pi}$$

TIPOS ANISOTRÓPICOS

Os tipos de refletâncias anisotrópicas (*plastic2*, *metal2*, *trans2*) usam as mesmas fórmulas com exceção dos termos exponenciais, $f_s(\hat{q}_i)$ e $g_s(\hat{q}_i)$. Esses termos usam um vetor adicional, \vec{b} , ressaltando a orientação elíptica. Estas fórmulas são dadas como:

$$f_s(\vec{q}_i) = \frac{1}{4\pi\sqrt{\alpha_{ix}\alpha_{iy}}}\exp\left[\frac{\frac{(\vec{h}_i\cdot\hat{x})^2}{\alpha_{ix}} + \frac{(\vec{h}_i\cdot\hat{y})^2}{\alpha_{iy}}}{(\vec{h}_i\cdot\hat{n}_p)^2}\right]$$

$$\hat{x} = \hat{y} \times \hat{n}_p$$

$$\hat{y} = \frac{\hat{n}_p \times \vec{b}}{\|\hat{n}_p \times \vec{b}\|} \quad \alpha_{ix} = a_5^2 + \frac{\omega_i}{4\pi} \quad \alpha_{iy} = a_6^2 + \frac{\omega_i}{4\pi}$$

$$g_s(\vec{q}_i) = \frac{1}{\pi\sqrt{\beta_{ix}\beta_{iy}}}\exp\left[\frac{\frac{(\vec{c}_i\cdot\hat{x})^2}{\beta_{ix}} + \frac{(\vec{c}_i\cdot\hat{y})^2}{\beta_{iy}}}{\frac{(\hat{n}_p\cdot\vec{c}_i)^2}{\|\vec{c}_i\|^2} - 1}\right] \quad \vec{c}_i = \hat{q}_i - \hat{t} \quad \hat{t} = \frac{\hat{v} - \vec{d}}{\|\hat{v} - \vec{d}\|}$$

$$\beta_{ix} = a_5^2 + \frac{\omega_i}{\pi} \quad \beta_{iy} = a_6^2 + \frac{\omega_i}{\pi}$$

TIPOS BRDF

Os tipos mais reais (*plasfunc*, *plasdata*, *metfunc*, *metdata*, *BRTDfunc*) usam as mesmas fórmulas básicas dadas na equação (1), mas permitem que o usuário especifique ρ_{si} e τ_{si} como funções ou dados ao invés de especificar as fórmulas padrão de Gauss. Observa-se que os termos exponenciais $f_s(\hat{q}_i)$ e $g_s(\hat{q}_i)$ com os radicais em seus denominadores são alterados.